



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ENERGETICKÝ ÚSTAV

ENERGY INSTITUTE

**VYUŽITÍ BIOMASY PRO KOGENERACI MALÝCH
VÝKONŮ**

BIOMASS UTILIZATION FOR COGENERATION SMALL POWER

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Štěpán Neminář

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Marek Baláš, Ph.D.

BRNO 2017

Zadání bakalářské práce

Ústav: Energetický ústav
Student: Štěpán Neminář
Studijní program: Strojírenství
Studijní obor: Energetika, procesy a životní prostředí
Vedoucí práce: Ing. Marek Baláš, Ph.D.
Akademický rok: 2016/17

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Využití biomasy pro kogeneraci malých výkonů

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

V poslední době je biomasa velmi oblíbeným palivem pro domovní vytápění i jako zdroj energie pro centrální zásobování teplem či výrobu elektrické energie. Na jednu stranu je biomasa obnovitelný zdroj energie, či zdroj, který si umíme vyrobit (vypěstovat), na druhou stranu její využívání má zpravidla nižší účinnost než zdroje jiné, její spalovací vlastnosti nejsou optimální a mluví se i o některých negativních jevech s využíváním biomasy souvisejících.

Cíle bakalářské práce:

Cílem bakalářské práce je posouzení možností využití biomasy pro kombinovanou výrobu tepelné a elektrické energie malých výkonů (1-500 kW_e).

Pro každou technologii bude uveden princip, schema, výpočet účinností, výhody, nevýhody a příklady praktického využití.

V závěru práce bude provedeno porovnání všech variant.

Seznam doporučené literatury:

BALÁŠ, Marek. Kotle a výměníky tepla. Vyd. 2. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2013. ISBN 978-80-214-4770-7.

JANDAČKA, J. et al. Technologie pre zvyšovanie energetickeho potencialu biomasy. 1. Žilina, 2007. ISBN 978-80-969595-4-9.

MALAŤÁK, Jan a Petr VACULÍK. Biomasa pro výrobu energie. Praha: Česká zemědělská univerzita v Praze, 2008. ISBN 978-80-213-1810-6.

PAVELEK, Milan. Termomechanika. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2011. ISBN 978-8-214-4300-6.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2016/17

V Brně, dne

L. S.

doc. Ing. Jiří Pospíšil, Ph.D.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

Abstrakt

Tato bakalářská práce se zabývá využitím biomasy pro malé kogenerační zařízení do výkonu 500 kW_e. V první části jsou popsány technologie, pomocí kterých se vyrábí hodnotnější paliva než je pevná biomasa. V této kapitole jsou také popsány novější technologické postupy, které využívají odpadní biomasy. Na tuto část navazuje shrnutí plyných a kapalných produktů vzniklých zpracováním, kde jsou zmíněny možnosti jejich využití v kogeneraci. V poslední části mé práce jsou popsána kogenerační zařízení, která se používají při malých elektrických výkonech a jsou zde shrnuty jejich výhody a nevýhody i s praktickými příklady jejich využití. V závěru jsou poté tato zařízení porovnávána a je zmíněno jejich možné využití do budoucna.

Klíčová slova

Biomasa, kogenerace malých výkonů, zpracování biomasy, kombinovaná výroba elektřiny a tepla, kogenerační jednotka

Abstract

The subject of this thesis is the utilization of biomass for cogeneration units of small power (to 500 kW_e). Within the first paragraphs the thesis focuses on technologies which produce more valuable fuels than the solid biomass. This chapter also describes the most recent processes of waste biomass usage. The following section summarizes gaseous and liquid products of this procedure and their feasible use in co-generation. In the last part of this thesis author describes a CHP devices which are used in small electric power production and assesses their advantages and disadvantages. Consequently, some options of their practical usage are highlighted. As a conclusion, these devices are compared and their possible future application is illustrated.

Key words

Biomass, small power cogeneration, processing of biomass, combined heat and power production, cogeneration unit

Bibliografická citace

NEMINÁŘ, Š. *Využití biomasy pro kogeneraci malých výkonů*. Brno, 2017. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. 45 s. Vedoucí práce Ing. Marek Baláš, Ph.D.

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma *Využití biomasy pro kogeneraci malých výkonů* vypracoval samostatně na základě použité literatury uvedené v seznamu použitých zdrojů.

V Brně, dne 26. 5. 2017

Podpis

Poděkování

Tímto bych chtěl poděkovat vedoucímu panu Ing. Marku Balášovi, Ph.D. za odborné rady a připomínky, které vedly k vytvoření této práce.

Obsah

Úvod.....	11
1 Biomasa	12
1.1 Rozdělení biomasy	12
2 Technologie zpracování biomasy	13
2.1 Zplyňování	14
2.1.1 Reaktory s pevným ložem.....	15
2.2 Pyrolýza.....	17
2.2.1 Pyrolýzní technologie pro zpracování biomasy.....	17
2.3 Anaerobní fermentace	18
2.3.1 Rozdělení bioplynových technologií	19
2.4 Alkoholové kvašení a výroba bioetanolu.....	20
2.5 Esterifikace a výroba bionafty	21
3 Produkty zpracovávání biomasy a jejich využití ke kogeneraci.....	23
3.1 Generátorový plyn – zplyňování.....	23
3.2 Bioolej – pyrolýza	24
3.3 Bioetanol – alkoholová fermentace.....	25
3.4 Metylester – esterifikace	25
3.5 Bioplyn – anaerobní fermentace	26
4 Kogenerační zařízení malých výkonů.....	28
4.1 Spalovací motory	29
4.1.1 Spalovací motor na bioplyn	31
4.1.2 Účinnost spalovacích motorů.....	31
4.2 Stirlingův motor	32
4.2.1 Možnosti využití Stirlingova motoru.....	33
4.3 Organický Rankine – Clausiův cyklus s parní turbínou.....	33
4.3.1 Možnosti použití ORC	34
4.4 Mikroturbína	34
4.5 Palivové články	35
4.6 Výpočet účinnosti kogeneračních zařízení.....	37
Závěr	38
Seznam použitých zdrojů.....	39
Seznam použitých symbolů	42
Seznam použitých zkratk	43
Seznam použitých obrázků	44
Seznam použitých tabulek	45

Úvod

Kogenerace malých výkonů je v poslední době jedna z nejvíce rozvíjejících oblastí energetiky. Tato oblast se čím dál více rozšiřuje díky dotacím na kogenerační výrobu elektřiny a tepla i v České republice. Hojně se při této výrobě používá biomasa, jelikož je to zdroj velmi dostupný a levný. Proto se v současnosti velké množství vytopen, a dokonce i kotlů v domácnostech, předělává na kombinovanou výrobu. Díky tomu se šetří velké množství primární energie a zvyšuje se celková účinnost zařízení.

Toto téma mě zaujalo právě díky možnosti úspory paliva a využití širokého spektra organických odpadů, o kterých se ještě donedávna jako o palivu neuvažovalo. Navíc používáním biomasy se snižuje energetická závislost na dovozu fosilních paliv a zároveň se zvyšuje využití obnovitelných zdrojů, kterým biomasa určitě je. Myslím si, že tato oblast je velmi perspektivní, obzvláště v ČR, kde není moc velký prostor pro ostatní obnovitelné zdroje energie. Právě proto se biomasa podílí více než 80 % na vyrobené elektřině z kogeneračních zařízení do elektrického výkonu 500 kW_e, což je způsobeno hlavně velkým množstvím bioplynových stanic. Vyrobená elektřina kogenerací z biomasy má ale i významný podíl z celkové vyrobené elektřiny a to necelých 3,5 %, což není zanedbatelné. Na tak velkém zastoupení má opět velký podíl produkce elektřiny z bioplynu, který je v České republice hlavním zdrojem pro kogeneraci malých výkonů.

V celé práci nicméně nebude popsána jen technologie bioplynových stanic, ale budou vyjmenované všechny možné technologie zpracování biomasy, které jsou vhodné pro malé výkony. U produktů vzniklých těmito procesy poté bude popsáno jejich možné uplatnění v kogeneračních zařízeních, které budou podrobněji rozepsány v poslední části práce, kde budou uvedené i jejich výhody a nevýhody.

1 Biomasa

Obecně je pod pojmem biomasa míněna veškerá organická hmota na naší planetě, účastníci se koloběhu živin v biosféře. Jsou to těla všech organismů – živočichů, rostlin, bakterií, hub a sinic včetně produktů, které tyto organismy vyprodukují. Díky tomu může být biomasa označována jako CO₂ neutrální, což znamená, že při jejím spalení je uvolněné množství oxidu uhličitého stejné jako množství, které rostliny spotřebují při fotosyntéze. To, že je biomasa neutrální zdroj ale neznamená, že nepřispívá ke zvyšování množství oxidu uhličitého v atmosféře. Pouze to naznačuje její bilanci CO₂, která je v průběhu několika let nulová. Biomasa obsahuje kromě uhlíku také jiné látky, jejímž spalováním nebo jinou úpravou jsou produkovány nežádoucí emise jako jsou aromatické uhlovodíky, dioxiny nebo oxidy dusíku a síry. Proto je dobré využívat zejména biomasu, která už nemá další využití, takzvanou odpadní biomasu.

1.1 Rozdělení biomasy

Z energetického hlediska se biomasa dělí na odpadní a záměrně pěstovanou. Nevýhodou záměrně pěstované biomasy je nutnost jejího nákupu pro následné zpracování, a s tím související zdražování některých plodin. S odpadní biomasou, je zase na druhou stranu spojeno složitější transportování, a uplatňuje se hlavně v místě její produkce. Její využití ale snižuje produkci odpadů a energetickou závislost na fosilních palivech. Hlavní zdroje odpadní biomasy jsou uvedeny níže [1].

Odpadní biomasa:

- **Rostlinné zbytky ze zemědělství** – kukuřičná, řepková, obilní sláma
- **Odpady živočišné výroby** – exkrementy hospodářských zvířat, zbytky krmiv
- **Lesní odpad** – kůra, větve, pařezy, manipulační odřezky, probírky
- **Organické komunální odpady** – kaly z ČOV, zbytky z údržby zeleně
- **Odpady z potravinářského průmyslu** – odpady z jatek, mlékáren, lihovarů
- **Odpady dřevozpracujícího průmyslu** – piliny, odřezky, odpad z papíren

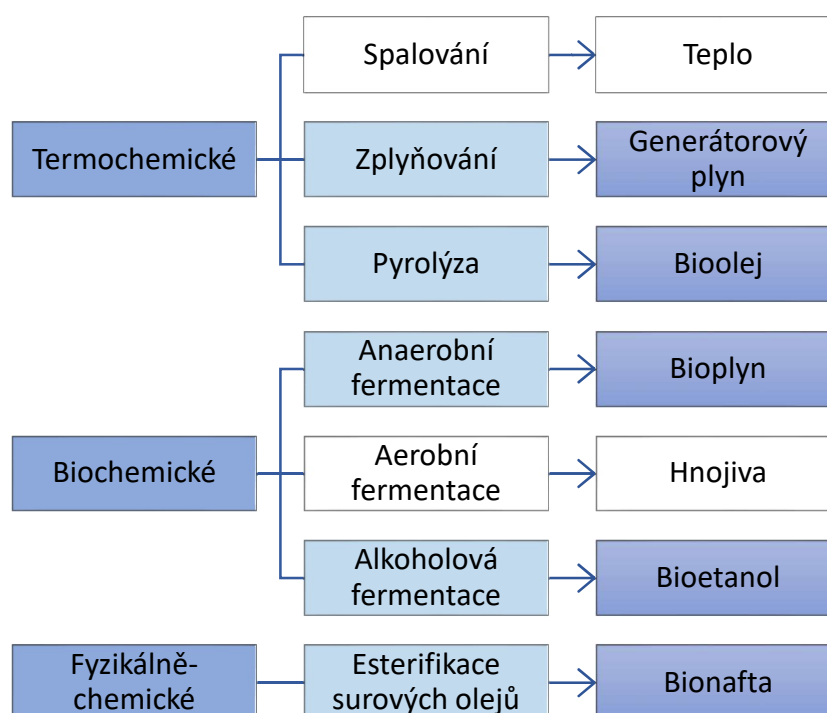
Záměrně pěstované plodiny:

- **Rostliny jednoleté a víceleté** – laskavec, konopí seté, sléz krmný
- **Víceleté a vytrvalé rostliny** – topinambur, šťovík krmný, oman pravý
- **Energetické trávy** – svěrp bezbranný, psineček pravý
- **Rychle rostoucí dřeviny** – topoly, vrby, olše, břízy

Biomasa jako palivo, je nesmírně důležitý lokální zdroj, který lze využít v místě, nebo nedaleko místa výskytu. Což je dáno poměrně vysokými logistickými náklady. Tyto náklady jsou vysoké zejména pro velký objem biomasy vzhledem k využitelné energii, kterou obsahuje. Celkový výkon zařízení na zpracování biomasy se tedy odvíjí hlavně od velikosti spádové plochy. Tudíž jsou instalovány výkony poměrně menší, než je tomu například u technologií na zpracování fosilních paliv.

2 Technologie zpracování biomasy

Způsob zpracování biomasy závisí hlavně na jejím složení a fyzikálních vlastnostech, zejména na vlhkosti a podílu jednotlivých látek obsažených v surovině. Podle toho se potom odvíjí následné nakládání. Také je velmi důležité si uvědomit, že jen některé technologie jsou vhodné pro energetické využití. Nevhodná je například aerobní fermentace, protože jejím produktem je kompost a hodí se pouze na výrobu hnojiv. Další technologie, která se jeví jako nevhodná je spalování, protože se využívá hlavně pro ohřev páry v parních elektrárnách. Nicméně i spalování se začíná prosazovat v malých výkonech hlavně díky ORC oběhu a Stirlingovu motoru. Stále ale platí, že pro výkony do 500 kW_e se nejvíce hodí technologie, kdy je produktem plyn. Ať už je to syntézní plyn neboli dřevoplyn, který je produktem zplyňování nebo pyrolýzní plyn, který se uvolňuje převážně při rychlé pyrolýze a větší část se ho mění na bioolej. Nejlepší parametry má však bioplyn, vznikající po metanovém kvašení, který má z těchto plynů nejvyšší výhřevnost. Pro kombinovanou výrobu elektřiny a tepla se nicméně mohou využívat i kapalná biopaliva vznikající po mokřích procesech zpracování biomasy. Jejich využívání však v České republice není příliš rozšířeno. Na obrázku 2.1 pak můžeme vidět základní rozdělení technologií a jejich produkty, které se následně využívají.



Obrázek 2.1: Rozdělení technologií zpracování biomasy a hlavní produkty

Termická přeměna je nejjednodušší a nejrozšířenějším způsobem zpracování biomasy. A to hlavně díky spalování, jak již ale bylo zmíněno, tak se tato technologie příliš nehodí pro malé výkony a spíše je využíváno pouze odpadní teplo, které je při spalování biomasy produkováno.

2.1 Zplyňování

Všechna energetická využití biopaliv se ve skutečnosti neobejdou bez zplyňující fáze. Jelikož i prosté hoření dřeva je z 80 % spalování teplem uvolněného dřevního plynu a teprve po jeho odplynění a spálení shoří zbytek dřevěného uhlí přímou oxidací. Navíc má zplyňování nižší energetické ztráty než spalování a efektivnější využití paliva. Má ale vyšší investiční a technologické nároky [2] [3].

Proces zplyňování obsahuje tři základní pochody, sušení, pyrolýzu, redukci a oxidaci, kde první 3 pochody spotřebovávají teplo a poslední teplo dodává. Teplo však může být i do rektoru přiváděno z okolí. Podle toho rozlišujeme zplyňování alotermní a autotermní (bez přiváděného tepla). Když tedy teplo do procesu není dodáno musí se vytvořit oxidací biomasy. Toto teplo je poté spotřebováno na ostatní reakce a dochází energetické rovnováze v rektoru. Při autotermním procesu se produkuje plyn o výhřevnosti do 8 MJ/m³. S tímto procesem je také spojen podstatný úbytek paliva, který představuje až čtvrtinu celkové hmotnosti biomasy. Tomu se dá zamezit přivedením tepla, (alotermním zplyňováním) ale tím doprovázeným zvýšením investičních nákladů na složitější technologii. Výhodou tohoto způsobu však je zvýšení výhřevnosti generátorového plynu až na 14 MJ/m³. Teplo do rektoru se dodává předeřhřátým zplyňovacím médiem anebo inertním materiálem. Nejčastěji používaným je písek [4].

Hlavní snahou při procesu zplyňování je získání plynu s co největším energetickým potenciálem. Jak již bylo zmíněno můžeme toho dosáhnout přivedením tepla, ale také volbou zplyňovacího média, zvýšením tlaku nebo samotnou konstrukcí rektoru. Cílem celého procesu je získání co největšího obsahu hořlavých látek, kterými jsou CO, CH₄ a H₂. Toto složení můžeme nejvíce ovlivnit volbou média viz tabulka 2.1 [5] [3].

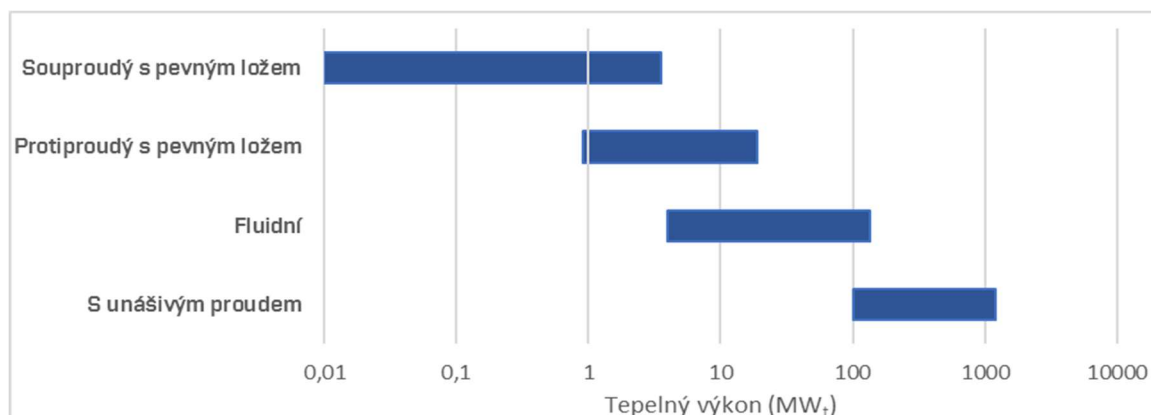
Tabulka 2.1: Složení plynu při zplyňování dřeva o obsahu vody 20 hm. % [3]

	Zplyňování vzduchem (autotermní)	Zplyňování parokyslíkovou směsí (autotermní)	Zplyňování párou (alotermní)
Výhřevnost [MJ/m ³]	4–6	12–15	12–14
H ₂ [%]	11–16	25–30	35–40
CO [%]	13–18	30–35	25–30
CO ₂ [%]	12–16	23–28	20–25
CH ₄ [%]	3–6	8–10	9–11
N ₂ [%]	45–60	< 1	< 1

Další mechanismus, který je používán pro změnu vlastností generátorového plynu je konstrukce rektoru. Existují 3 základní typy generátorů.

- S pevným ložem
- S fluidním ložem
- S unášivým proudem

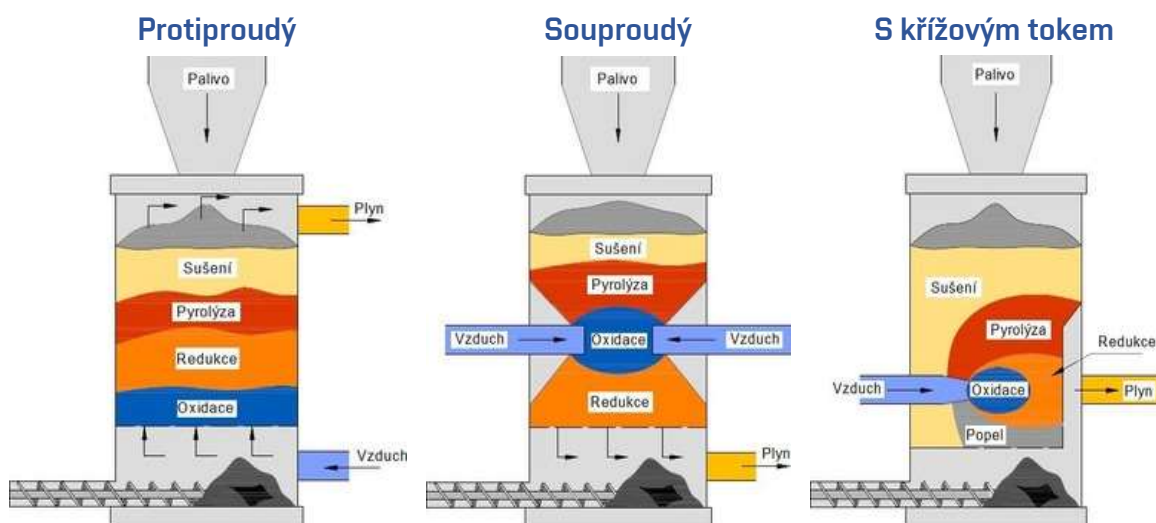
Volbu konstrukce nejvíce ovlivňuje palivo, které máme k dispozici, ale také potřebný výkon pro zplyňování. Pro nejnižší výkony se používají zplyňovače s pevným ložem. Ostatní konstrukce se tedy pro malé výkony nehodí, jak je vidět na obrázku 2.2, protože mají mnohem vyšší investiční náklady.



Obrázek 2.2: Orientační výkon různých zplyňovacích generátorů [4] [6]

2.1.1 Reaktory s pevným ložem

Toto provedení je ze všech nejjednodušší a investičně nejméně náročné. Dá se ale použít pouze pro malé výkony. Reaktory s pevným ložem můžeme dále rozdělit podle směru proudu následovně:



Obrázek 2.3: Schéma reaktorů s pevným ložem [5]

Protiproudý reaktor je jeden z nejrozšířenějších, protože je technicky nejjednodušší. Biomasa je přiváděna shora a zplyňovací médium, kterým může být vzduch nebo pára, proudí opačným směrem. Médium se tedy ohřeje ve spodním patře a poté odevzdává své teplo do horních tří reakcí. Plyn poté odchází ochlazen na přibližně 300 °C. Díky této vnitřní výměně tepla se dosahuje maximálního využití tepla, a tudíž i dobré účinnosti následované vysokým stupněm vyhoření biomasy. Díky vnitřní výměně tepla je možné zpracovat palivo i s velkou vlhkostí, a navíc se mohou zplyňovat velké i malé kusy paliva. Nevýhodou však je velké množství obsažených dehtů a pyrolýzních produktů. Pro následné použití plynu je tedy nutné jeho čištění [7].

Souproudý reaktor má nejčastěji přívod palivo z horní části a zplyňovací médium je přiváděno z boční strany nebo shora. Plyn tedy směřuje stejným směrem jako palivo. U tohoto typu reaktoru jsou procesní zóny umístěné v jiném pořadí než u protiproudého. To je způsobeno odlišným přísunem vzduchu, kdy médium je přiváděno do oblasti dřevěného uhlí (po zplynění). Tím se podstatně sníží emise dehtů (pod 100 mg/m³_N), díky takzvané zdvojené zóně, kde se dehet výrazně zredukuje. Produkce dehtů je tak nízká, že vyprodukovaný plyn se dá ihned použít ve spalovacích motorech. Tento typ reaktoru je tedy pro použití se spalovacím motorem nejvhodnější. Nevýhodou tohoto provedení je velké množství prachových částic a velká citlivost na změnu teploty a výkonu. Při provozu na jiný než jmenovitý výkon se produkce dehtů značně zvyšuje. Souproudý zplyňovač je také náročný na složení a zrnitost paliva. To proto aby nedocházelo k blokování průchodu plynu a plyn nesměřoval proti proudu pohybu paliva. Často se tedy používá palivo ve formě briket nebo peletek. Pro spojení s kogenerací se tento zplyňovač používá nejvíce se spalovacími motory v rozmezí od 80 do 500 kW_e [7].

Speciální reaktor pro zplyňování jemné biomasy je *souproudý zplyňovač s otevřeným jádrem*. Používá se u biomasy s malou sypnou hmotností (rýžové slupky, piliny atd.), kde se nadá použít hrdlo, které by snižovalo průchodnost paliva. Aby se mohla taková biomasa zpracovat jsou zde přidány rotační rošty, které mají za úkol promíchat palivo a odvést popel z roštu [6], [7].

Reaktor s křížovým tokem dosahuje nejvyšších teplot z reaktorů s pevným ložem (1500 °C a více). Primárně je určen pro zplyňování dřevěného uhlí. Často se používá v rozvojových zemích z důvodu jednoduchého čištění, protože většinou stačí jen cyklon a filtr. Nevýhodou však je velká produkce dehtů, nízký rozsah výkonů a velké požadavky na kvalitu dřevěného uhlí [7].

Tabulka 2.2: Porovnání reaktorů s pevným ložem [6]

	Jednotky	Protiproudý	Souproudý	S otevřeným jádrem	S křížovým tokem
Palivo		dřevo	dřevo	piliny	dřevěné uhlí
- vlhkost	%	43 (max. 60)	12 (max. 25)	7–15	10–20
- podíl popeloviny	%	1,4 (max. 25)	0,5 (max. 6)	1–2 (max. 20)	0,5 – 1
- velikost zrna	mm	5–100	20–100	5–20	1–5
Dehty	g/m ³ _N	30–150	0,015 – 0,5	2–10	0,01 – 0,1
Citlivost na změnu výkonu		malá	velká	malá	velká
Účinnost (teplý plyn)	%	90–95	85–90	70–80	75–90
Účinnost (studený plyn)	%	40–60	65–75	35–50	70–85
Výhřevnost	MJ/ m ³ _N	4,5 – 5	5–6	4 – 4,5	5,5 – 6

I když bylo vyvinuto mnoho druhů zplyňovačů, zatím žádný nedokáže vyrábět generátorový plyn bez dehtů. Je to dané vlastnostmi paliva, ale i konstrukcí reaktoru. U protiproudého reaktoru s pevným ložem je toto množství tak vysoké, že se v Evropě skoro nepoužívá. Minimální produkci dehtů můžeme docílit provozem na nominální výkon anebo používáním vícestupňových zplyňovačů, ale i v těchto případech je často nutné plyn čistit [6].

2.2 Pyrolýza

Poslední metodou termické úpravy biomasy je pyrolýza. Je to proces, kdy se rozkládají organické látky při teplotách 150–900 °C bez přítomnosti nebo s velmi malým přístupem kyslíku, ten může být ve formě oxidu uhličitého nebo vodní páry. Základem pyrolýzy je ohřev paliva nad mez chemické stability obsažených organických sloučenin a jejich rozklad na nízkomolekulární sloučeniny a tuhý zbytek.

Materiál během celého procesu prochází různými pásy teplot. Při teplotách do 200 °C dochází k sušení a k desorpci absorbovaných látek, také se zde mohou uvolňovat první těkavé látky. Potom následuje proces tzv. suché destilace, který probíhá až do 500 °C, kde se uvolňuje velké množství dehtových par a dochází k odpaření zbytku vody. Nejvíce produkovaným plynem v této fázi je methan. Při teplotách nad 500 °C se dále štěpí a transformují látky, které vznikly suchou destilací a z pevného uhlíku, ale i z vyprodukovaných kapalných látek, se stávají stabilní plyny jako jsou (CO_2 , CH_4 , C_2H_6 , N_2). Poměr plynných, kapalných a pevných látek závisí hlavně na rychlosti a teplotách dosahovaných při pyrolýzním procesu. Základní rozdělení je na rychlou pyrolýzu a na karbonizaci, kde první zmíněná dosahuje vyšších teplot produkuje poměrně větší množství kapalných látek. Přibližné složení získané při těchto procesech je uvedeno v tabulce [7]

Tabulka 2.3: Orientační podíl produktů při pomalé a rychlé pyrolýze [6]

Skupenství	Rychlá pyrolýza	Karbonizace
Pevné (dřevěné uhlí)	5–15 %	20–35 %
Kapalné (bioolej)	60–80 %	30–35 %
Plynné (pyrolýzní plyn)	12–20 %	25–30 %

2.2.1 Pyrolýzní technologie pro zpracování biomasy

Hlavním důvodem používání pyrolýzy je co největší zisk kapalných produktů. Proto se nejčastěji používá rychlá pyrolýza, při které můžeme získat až 80 % biooleje. Pro přeměnu na plynná paliva se tato technologie nehodí, protože nedosahuje takových výsledků jako zplyňování. Proces rychlé pyrolýzy je relativně nová technologie a mnoho zařízení se teprve vyvíjí a stále se zkouší různé konstrukce.

Nejčastěji používaná a nejvíce rozvinutá je metoda s fluidními reaktory, kde se jako teplosměnné médium používá písek, který je společně vháněn s rozemletou biomasou. Písku je asi dvacetinásobné množství než biomasy a zaručuje velice rychle odplynění řádově v sekundách. Plyny následně jdou přes rotační vysokoteplotní odlučovač do chladiče. Tam dojde k rychlému zchlazení a kondenzaci plynů na bioolej. Zbylé plynné látky, které nezkondenzují jdou společně se vzniklým uhlím zpátky do fluidního reaktoru, kde se spálí a zahřejí inertní materiál. Během celého procesu se teplota pohybuje v rozmezí 500–600 °C. Jedná se tedy o termický proces, při kterém se dosahuje nejnižších teplot a zároveň se při něm biomasa zpracovává rychleji než u spalování nebo zplyňování [8].

2.3 Anaerobní fermentace

Při procesu anaerobní fermentace je primární, na rozdíl od pyrolýzy, výroba plyných paliv a to konkrétně bioplynu. Ten vzniká postupnou mikrobiologickou transformací organických složek v podmínkách bez přístupu vzduchu a při mírně zvýšené teplotě. Složení bioplynu je velmi proměnné a závisí na mnoha faktorech. Mezi ty nejdůležitější patří: použitý substrát a jeho kvalita, typ reaktoru, doba kontaktu, skladba a přizpůsobení bakteriálních kultur, obsah sušiny, teplota, pH a zatížení vyhnívacího prostoru. Orientační složení bioplynu z různých zdrojů je uvedeno v tabulce 2.4.

Tabulka 2.4: Srovnání různých bioplynů [9]

	Skládkový plyn	Bioplyn (ČOV)	Bioplyn (prasečí kejda)
Výhřevnost (MJ/m ³)	16,9	21,1	24,0
CH ₄ (%)	49	61	69
CO ₂ (%)	46	38	31
H ₂ (%)	1	1	-
CO (%)	1	-	-
O ₂ (%)	3	-	-
NH ₃ (mg/m ³)	-	-	40
H ₂ S (mg/m ³)	350	1 000	2 300

Pro srovnání je zde uvedeno složení plynu vzniklého anaerobní fermentací z čistírenských kalů a skládkový plyn, který sice nevznikl v bioplynové stanici, ale podobným principem na skládce komunálního odpadu. Jelikož však skládka není naprosto plynotěsná, tak skládkový plyn v malé míře obsahuje i kyslík, který se tam dostal ze vzduchu. To je i důvod nižší výhřevnosti. Stejně jako na skládce, probíhají tyto děje například v bažinistích nebo na dně jezer, kde tyto procesy probíhají za nižších teplot než v bioplynových stanicích (BPS).

V BPS se ale kromě bioplynu tvoří i takzvaný fugát a digestát, které jsou vedlejšími, ale hodnotnými produkty pro zemědělskou výrobu. Digestát se může použít rovnou, nebo po mírné úpravě, jako hnojivo nebo přídavek do kompostu. A fugát, pokud splňuje limity na obsah nežádoucích látek v hnojivu, může být využit stejně. Z toho plyne, že anaerobní fermentace je prospěšný jak pro energetiku, tak pro zemědělství.

Proces fermentace v bioplynové stanici má tyto čtyři základní fáze:

- *Hydrolyza* – vznik jednoduchých cukrů, aminokyselin a mastných kyselin působením anaerobních bakterií
- *Acidogeneze* – působením acidofilních bakterií vznikají organické kyseliny, oxid uhličitý a vodík
- *Acetogeneze* – při přítomnosti octotvorných bakterií dochází k vzniku kyseliny octové a dále se produkuje oxid uhličitý a vodík
- *Metanogeneze* – při této poslední fázi se tvoří metan, oxid uhličitý a voda vlivem působení metanotvorných bakterií

Rychlost výše zmíněných fází je nejvíce závislá na teplotě. Proto se používá dělení na tři základní teplotní pásma, která prospívají jednotlivým bakteriálním kmenům. Jedná se o oblasti *psychrofilní* (do 20 °C), *mezofilní* (25–45 °C) a *termofilní* (nad 45 °C). Někdy se uvádí i další oblast, kterou je extrémně termofilní (nad 60 °C). U takto vysokých teplot je však nebezpečí výbuchu plynu a používají hlavně při vyšších nárocích na hygienizaci

materiálu. Tyto teploty se také mírně liší pro různé druhy anaerobní fermentace. Pro suchou metodu se teploty nejčastěji pohybují od 32–38 °C a pro metodu mokré fermentace se používají častěji o něco vyšší teploty (35–55 °C). Není to ale pravidlem [9].

2.3.1 Rozdělení bioplynových technologií

Jak již bylo zmíněno výše, tak anaerobní fermentaci můžeme rozdělit podle suché metody zpracování nebo mokré.

Suchá fermentace se dá použít pro zpracování biomasy s vyšším obsahem sušiny (20–60 %), přičemž ideální je obsah do 35 %. Tento proces je tedy vhodný pro zemědělské plodiny jako je kukuřičná siláž, travní senáž či hnůj z živočišné výroby. Tato technologie je konstrukčně jednodušší a nejčastěji se u suché metody setkáváme s fermentory tzv. garážového typu. Tam se k manipulaci s biomasou používá kolový nakladač, který ji dávkuje do fermentačních boxů. Pro rovnoměrnou tvorbu bioplynu je potřeba alespoň čtyř těchto boxů, jelikož se jedná o diskontinuální proces, při kterém se bioplyn uvolňuje nerovnoměrně. Biomasa se vyměňuje v každém boxu přibližně co 30 dní. Při každém navezení se použije část vyvezené biomasy a promíchá se s novou, z důvodu rychlejšího nastartování procesu. Poté dojde k uzavření boxu a zahřátí biomasy. To se provádí pomocí podlahového topení a zkrápěním teplým perkolátem, který je kapalným produktem fermentace. Ten zároveň obnovuje mikrobiální kulturu na povrchu biomasy. Vznikající bioplyn je v průběhu odsáván a transportován do plynojemu. Tato metoda i přes výhody menší konstrukční náročnosti je méně čtená než metoda mokré fermentace, kvůli větší náročnosti na obsluhu a méně vyzkoušené technologii [10].

Mokrá fermentace je využívanější také kvůli dostupnější surovině, což jsou převážně kravská nebo prasečí kejda. Tyto látky mají nižší obsah sušiny a jsou pro tuto metodu vhodnější. Tato technologie dokáže zpracovat až 12% podíl sušiny a ideálně se pohybuje od 8 do 10 %. Mokrá fermentace je technicky náročnější jak na úpravu, tak na transport. Nejdříve se musí biomasa pomlít na požadovanou velikost, aby nedocházelo k ucpávání čerpadel. Před vstupem do fermentoru je také třeba homogenizovat materiál anebo přidat látky, aby se dosáhlo požadovaného množství sušiny. Poté se materiál transportuje do fermentoru, kde probíhá kvašení. Fermentace zde probíhá buď diskontinuálně nebo semi-kontinuálně. Kontinuální proces má pravidelný přísun čerstvého substrátu (doplňuje se 1–2 denně) a nádrž se vůbec nevyprazdňuje. Pouze v případě poruchy nebo pravidelného čištění. Semi kontinuální postup se používá pro biomasu s mírně větším obsahem sušiny. Ten využívá dvou nádrží, kdy jedna se začátku slouží jako přípravná substrátu, kterým se druhá rovnoměrně plní. Až je druhá nádrž naplněna, její obsah se přesune zpátky do skladovací nádrže a reakční nádrž může být vyčištěna. Oba principy plnění se vyznačují stabilní tvorbou bioplynu a dobrou hygienizací při fermentaci [6] [9].

Aplikace mokré fermentace mnohonásobně převyšuje suché provedení. Je to hlavně způsobeno tím, že suchá metoda byla navržena hlavně ke zpracování komunálního odpadu. Jelikož se ale zpřísňuje legislativa na výrobu bioplynu z odpadů, tak se pravděpodobně jednotky použijí na výrobu plynu z biomasy a dojde k většímu rozvoji této technologie.

2.4 Alkoholové kvašení a výroba bioetanolu

Poslední metodou biochemických přeměn biomasy na energeticky hodnotnější palivo je alkoholová fermentace. Ta mění škrob a cukry obsažené v palivu na etanol. Pokud jsou použity plodiny s vysokým obsahem cukrů, jakou je například cukrová řepa, je proces jednodušší. Protože obsažené cukry mohou kvasinky rovnou přeměnit na alkohol. Když ale ve výchozí surovině převládají škroby, musí nejdříve materiál tzv. zcukernatět, kdy se škrob převede na jednoduše zkvasitelné sacharidy (glukosu nebo maltosu). Nejdříve se musí obilí rozdrtit a potom se do vzniklé drtě přidávají enzymy, které umí zpracovat škrob na sacharidy. Směs se potom zahřeje na 60–90 °C, přičemž dochází k přeměně škrobu na kapalínu. Kapalína se poté převede do zásobníku, kde se upraví její pH aby mohla být použita při kvašení. Ke kvašení poté dochází ve fermentační nádobě, kde by se měla udržovat teplota 18–24 °C. Sacharidy se v ní mění na etanol, který dosahuje obsahu maximálně 14 %. Při vyšším obsahu se totiž reakce kvašení značně zpomaluje a dochází ke zhoršení stavu kvasinek nebo k jejich zničení [6].

Ke zvýšení koncentrace se poté používá opakovaná kontinuální destilace, při které se dosáhne koncentrace etanolu až 96 hm. % (zbytek tvoří převážně voda). Pro odvodnění se pak používá extraktivní destilace do té doby, než dosáhneme obsahu etanolu alespoň 99,5 %. Tato hranice je potřebná, aby se bioetanol mohl mísit s benzínem nebo sloužil jako samostatná pohonná látka. Pro výrobu bioetanolu touto metodou se hlavně používají plodiny záměrně pěstované. Většina z nich je uvedena v tabulce 2.5 [6].

Tabulka 2.5: Specifikace záměrně pěstovaných zemědělských plodin [11]

Druh	škrob/cukr v % hmoty	výnos (t/ha)	výtěžnost etanolu (l/t)	výtěžnost etanolu (hl/ha)
Řepa krmná	9,7	90	59	53
Řepa cukrová	16,0	30-50	90-100	38-48
Brambory	18,0	20-30	100-120	22-33
Kukuřice zrno	60,0	4-8	360-400	15-30
Kukuřice celá	11,0	47	67	31,9
Pšenice	62,0	2-5	370-420	8-20
Ječmen	52,0	2-4	310-350	7-13
Žito	55,5	3,5	36	12,8
Proso zrno	70,0	2-5	330-370	7-18
Bataty	26,0	10-20	140-170	16-31
Maniok	28,0	12-15	175-190	22-23
Topinambur	17,0	20-40	77	15-31

Používání zemědělských plodin jako zdroj pro výrobu bioetanolu je však hlavní nevýhodou. Díky této skutečnosti se celý proces prodražuje o nákup suroviny a tento proces se používá jen díky dotačním programům. Mnoho studií také tvrdí, že se do procesu přivádí více energie, než z něj vychází. Proto se vyvíjí nové technologie, které využívají odpadů z lesnictví, papírnictví a dalších zdrojů, které v sobě obsahují velké množství celulózy [12].

Základem zpracování celulózy je hydrolýza odpadních hmot na bázi rostlinných tkání, prováděná při teplotě 180–210 °C a při tlaku 1,1 - 1,6 MPa v kyselém prostředí. Při hydrolýze dochází k rozštěpení lignocelulózy na sacharidy. Vedlejšími produkty této reakce jsou pak lignin, fural a organické kyseliny, které se dají upravit na prodejné suroviny (čistý lignin, 92% fural, kyselina octová a mravenčí). Na hydrolýzu dále navazuje klasický princip lihového kvašení, který byl popsán před chvílí.

Zkušební zařízení s technologií hydrolyzy celulózy bylo vybudováno v areálu Výzkumného ústavu rostlinné výroby v Praze – Ruzyni, kde sloužilo k hydrolyzním experimentům. Při jejich řešení na poloprovozním hydrolyzním zařízení řešili řadu problémů spočívajících v mechanické úpravě odpadu, aby byla zajištěna průchodnost materiálu celým systémem. Experimenty s jednotlivými druhy odpadů bohatých na celulózu umožnily zjistit optimální tlakové a teplotní parametry hydrolyzy a optimální dobu expozice, při kterých dojde k nejvyšším výtěžkům zkvasitelných cukrů a dalších vedlejších produktů, zejména furalu. Dosažení nejlepších výsledků z experimentu je vyobrazeno v tabulce 2.6 [12].

Tabulka 2.6: optimální parametry hydrolyzy pro výrobu bioetanolu [12]

Odpad	Teplota °C	Tlak MPa	Expozice min.	Výtěžnost cukrů kg/t suš.	Výtěžnost bioetanolu l/t suš.
Dřevo	185	1,1	12	209	142
Dřevo (recykl)	205	1,6	12	347	215
Papír	195	1,4	12	352	238
Papír	205	1,6	12	397	269
Papír + sláma	205	1,6	12	448	303

V tabulce 2.6 jde vidět že výtěžnost bioetanolu lze srovnat s některými záměrně pěstovanými plodinami z tabulky 2.5. Cílem celého projektu bylo snížení ceny bioetanolu, aby celý proces mohl fungovat bez dotačních programů. V experimentu se jim toto podařilo dokázat. Z toho vyplývá že tento způsob výroby etanolu je konkurenceschopnější v porovnání tzv. agrolihovary, které nakupují škrobnaté nebo cukernaté plodiny, místo aby využili odpadů bohatých na celulózu.

2.5 Esterifikace a výroba bionafty

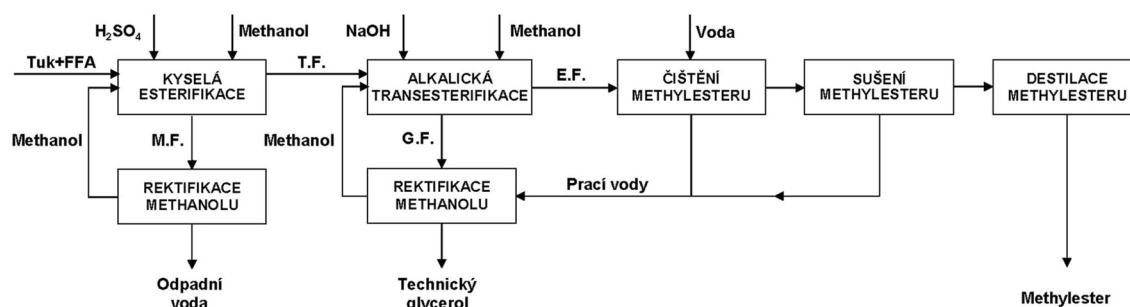
Jako jediný proces zastoupený ve fyzikálně chemické úpravě biomasy je esterifikace. Cílem celého procesu je získat co největší množství biooleje, ze kterého se poté získají metylestery, v česku nazývané MEŘO (metylester řepkového oleje) a v evropské unii používaný název FAME. Jejich vlastnosti jsou velmi podobné naftě, proto se často používá název bionafta.

Výchozí surovinu procesu esterifikace je semeno bohaté na olej. V našich zeměpisných podmínkách se nejvíce využívá řepka olejná a ze zahraničí se poté dováží i palmový olej, který má nižší obsah nenasycených mastných kyselin. Získávání oleje ze semen se provádí ve dvou stupních. Pro malé výkony je to předlisování-dolisování (10 % oleje se nevyužije) a pro větší je to lisování-extrakce organickým rozpouštědlem, po kterém se množství oleje pohybuje do 2 %. V prvním stupni (lisování) přitom v semenu zbývá přibližně 20 % oleje. Zbytek se tedy ze semena dostane extrakcí pomocí hexanu. Po extrahování zbytků oleje se pak výlisky schladí a uloží do sil, aby se pak mohli použít jako krmivo pro dobytek. Obsahují totiž velké množství bílkovin [6].

Získaný bioolej ještě ale nemá požadovanou kvalitu a obsahuje ještě velké množství v oleji nerozpustných látek (nečistoty, minerální látky, sacharidy, voda). K eliminaci těchto látek a zušlechtnění oleje se používá rafinace, která probíhá v několika krocích. Nejdříve se olej zbaví lipidů, poté se neutralizují volné nenasycené mastné kyseliny a následuje sušení a filtrace. Celý proces rafinace končí vakuovou destilací, kde se olej zbaví oděru.

Pro následné přimíchávání do pohonných hmot nebo samostatnému využití se oleji musí snížit viskozita. To se provádí reesterifikací pomocí alkoholů, kdy se současně uvolňuje glycerol. Tento proces probíhá při 110 °C a přítomnosti kyselých katalyzátorů (kyselina sírová, katexy). Po reesterifikaci se kapalina rozdělí do dvou fází. Esterová fáze se zbaví metanolu a vody, čímž vznikne metylester. Glycerolová fáze se také zbaví metanolu a získá se glycerol a mastné kyseliny. Výhodou celého procesu výroby metylesterů z olejnatých semen je malé množství nezpracovatelných odpadů. Nevýhodou však je nákup suroviny pro výrobu biooleje, který tvoří až 80 % celkových nákladů. Proto se začíná prosazovat výroba z jiných zdrojů [6].

Jedním z takových způsobů je získávání *bionafty* z živočišných tuků (*AFME*). Tuk využitelný pro výrobu bio-nafty je získáván v kafilériích zpracovávající vedlejší živočišné produkty. Převážně se využívá tuku vepřového nebo hovězího původu. Produkty jsou poté podrobeny tepelně tlakové sterilizaci, při které jsou živočišné produkty nejdříve nadrceny, pak jsou ponechány při tlaku min. 0,3 MPa, teplotě min. 133 °C a po dobu min. 20 minut v nádrži. Takto sterilizovaný materiál je zbaven vody sušením (v destruktoech, sušárnách různého typu či s využitím odparek) za vzniku tzv. masokostní kaše. Ta je buď lisováním anebo extrakčními postupy rozdělena na tuk a živočišnou moučku. Tuk se dále čistí od vody a nečistot na de-kantérech. Poté už může být použit k výrobě metylesteru. Celý proces probíhá velmi podobně jako při výrobě metylesteru z rostlinných olejů. Průběh je naznačen v obrázku 2.4 [13].



Obrázek 2.4 Příprava metylesteru z živočišných tuků [13]

Živočišný tuk jako zdroj pro výrobu metylesteru i přes své výhody stále nepředstavuje významný podíl v ČR a ani v Evropě. Největší podíl zastupuje olej řepkový následovaný sójovým a palmovým olejem, který se do Evropy dováží. To by se však tímto rokem mělo změnit vlivem zpřísnění Direktivy EU, která zvýhodňuje používání paliv s vyšší úsporou produkce skleníkových plynů (GHG - “greenhouse gas emission”). Hodnoty pro jednotlivé suroviny pro výrobu metylesteru jsou uvedené v tabulce 2.7 [13].

Tabulka 2.7: Srovnání faktoru GHG surovin pro výrobu biopaliv [13]

Typ	Surovina	Úspora GHG /%/
Bioethanol	cukrová řepa	52
	obilí	16
Bionafta	odpadní živočišný tuk	89
	řepkový olej	44

3 Produkty zpracovávání biomasy a jejich využití ke kogeneraci

Obecně jako hodnotnější palivo využitelné v energetice se bere plyn, jelikož se dá lépe zředit se vzduchem a dochází k lepšímu spalování a s tím souvisejícím menší únik znečišťujících látek. Výhoda kapalného paliva je zase na druhou stranu jeho skladování, protože není potřeba vzduchotěsných plynojemů. Plynné palivo se tedy častěji používá nedaleko u zařízení, které vyrábí teplo a elektřinu a nadvýroba směřuje do zásobníků, které většinou slouží pouze k udržení stále dodávky a nemají velkou kapacitu.

3.1 Generátorový plyn – zplyňování

Využitelnost generátorového plynu nebo také energoplynu se odvíjí hlavně od jeho kvality (tzn. výhřevnosti, obsahu dehtu a využitelných složek). Pro většinu použití musí být generátorový plyn čištěn. Například plynový motor má velké nároky na obsah dehtů (pod 100 mg/m^3), ale nevádí mu vyšší obsah sirných sloučenin. Pro čištění se zpravidla používají dvě opatření, primární a sekundární. Primární se provádí hned v reaktoru při procesu zplyňování, jako je například volba zplyňovacího média, rozsah teplot nebo tlak v reaktoru. Sekundární opatření potom obsahují zařízení jako jsou cyklony, mokré vypírky, filtry nebo katalytické reaktory. Sekundární čištění se dále dělí na nízkoteplotní a vysokoteplotní. Při nízkoteplotním se generátorový plyn dostává do styku s kapalinou a tím se ochlazuje. A při vysokoteplotní metodě se využívá katalyzátorů. Můžou se používat katalyzátory přírodní nebo syntetické. Syntetické jsou mnohem dražší, ale také mnohem efektivnější při odstraňování určitých látek. Byly totiž vyvinuty přímo za tímto účelem a požívají se převážně tam, kde jsou vyšší nároky na čistotu plynu (u generátorového plynu s vyšší výhřevností) [14].

Podle výhřevnosti můžeme dělit plyn na nízko-výhřevný ($2,5\text{--}8 \text{ MJ/m}^3$), který se užívá pro průmyslový otop nebo je spoluspalován za účelem kombinované výroby elektřiny a tepla (KVET). Jeho využití v náročnějších technologiích je silně omezeno. Tam se používá středně-výhřevný plyn, který má výhřevnost nad 10 MJ/m^3 . Ten už je možné využít ke kombinované výrobě elektrické a tepelné energie bez potřeby smíchávání s jiným plynem.

Generátorový plyn se pro kogeneraci malých výkonů používá hlavně v plynových motorech. Může se ale použít i v palivových článcích nebo v mikroturbíně. V těchto zařízeních jsou ale vysoké nároky na čistotu plynu, takže by se tím značně zvýšily náklady. Výhodou však je větší účinnost výroby elektrické energie.

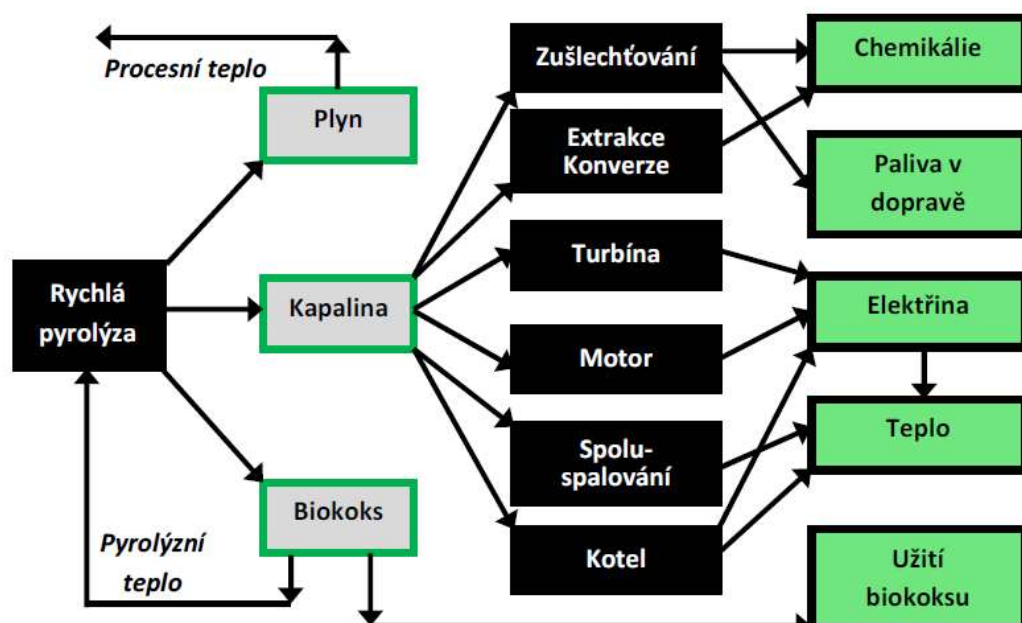
Plynový motor napojený na generátor je v současnosti jediný komerčně využitelný stroj pro KVET, který decentralizovaně využívá energoplyn. Pro bezproblémový chod motoru je ale nutné plyn zbavit nečistot a snížit obsah dehtu (pod 100 mg/m^3) a pevných částic (pod 5 mg/m^3). Vyšší obsah dehtů naopak nevádí palivovým článkům. Problém ale u nich je i velmi malý obsah sirných sloučenin a pevných částic. I přes vysokou míru čištění a vyšších nákladů, ale lze očekávat nárůst KVET z palivových článků, právě díky možnosti vyššího obsahu dehtu a účinnější výrobě elektřiny [14].

3.2 Bioolej – pyrolýza

Bio-olej, alternativně nazýván pyrolýzní benzín či pyrolýzní olej, je tmavě hnědá kapalina s ostrým charakteristickým zápachem. Je to komplexní směs organických sloučenin, obsahující vodu a mnoho derivátů kyslíkatých organických sloučenin (např. kyseliny, alkoholy a fenoly, karbonylové sloučeniny, ethery, estery, cukry, furany a také deriváty dusíkatých sloučenin). Přestože pyrolýzní olej obsahuje široké spektrum organických látek, nemusí se čistit, protože látky jsou obsaženy v nízkých koncentracích a nebrání tak dalšímu použití. V některých případech může nahradit paliva z ropy, protože má podobné fyzikální vlastnosti. Jeho chemické složení se ale výrazně liší, protože na rozdíl od fosilních paliv biomasa obsahuje velké množství kyslíku a vody (až 20 %). Obsah velkého množství vody je způsoben pyrolýzním procesem a díky přítomnosti vody je bioolej v kapalném skupenství. Složení pyrolýzního oleje je však velmi proměnlivé a závisí na surovině i technologii zpracování [15].

Pyrolýzní olej se kvůli velkému obsahu nežádoucích látek používá hlavně ke spalování nebo k spolu-spalování v kotlích pro ohřev vody nebo k vytápění. Nicméně existují i zařízení, kde se následně olej využívá ve spalovacím motoru ke kogenerační výrobě. Tyto zařízení ale nejsou moc rozšířené a vyskytují se v malém množství hlavně v Německu. Využití pyrolýzního oleje ale může být mnohem širší (příklady jsou uvedené v obrázku 3.1). V obrázku můžeme vidět, že chemikálie by rovněž mohly být významnou alternativou, například v koncepci tzv. biorafinérií, jejímž výsledkem jsou optimální kombinace paliv a chemikálií.

Pro větší rozšíření využití pyrolýzního oleje by však byly za potřebí informace o vhodných třídách kvality a technických podmínkách použití, které by podpořily zavedení olejů vyráběných rychlou pyrolýzou na trh s palivy. Zatím tedy nemůže konkurovat kapalným palivům vyráběných z biomasy jako je bionafta nebo bioetanol [8] [16].



Obrázek 3.1: Možnosti využití pyrolýzního oleje [16]

3.3 Bioetanol – alkoholová fermentace

V současné době je nejrozšířenější využívání bioetanolu v podobě nízko procentuálního přimíchávání do automobilového benzínu. Toto využití v EU upravuje směrnice 2009/30/EC, která umožňuje přidávat až 10 % bioetanolu do automobilového benzínu. Toto množství totiž nijak neovlivňuje provoz zážehové motoru a motor se tudíž nemusí upravovat. S rostoucí produkcí bioetanolu se ale hledají další možné varianty jeho využití. Jednu možnost představuje palivo E85 skládající se z 85 % bioetanolu a 15 % automobilového benzínu, které by mohlo být využito i pro kogeneraci. Pro používání tohoto paliva ale musí být motory speciálně upraveny, protože bioetanol má nižší mazací schopnosti než benzín. Paliva s velkým množstvím etanolu jsou nejvíce rozšířena v Brazílii, kvůli velké produkci alkoholu z cukrové třtiny [17].

To je i důvod vzniku první elektrárny na bioetanol právě v Brazílii, kde je toto palivo velmi levné. Elektrárna byla postavena v roce 2010 a předcházeli ji zkoušky, kde se porovnával etanol se zemním plynem. Bioetanol měl nižší produkci NO_x přibližně o 30 %, aniž by se snížil výkon elektrárny [18].

Pro kombinovanou výrobu tepla a elektřiny se biolih masově zatím nepoužívá. V poslední době se ale objevují projekty v Lotyšsku, kde zkoumají možnost využití bioetanolu pro kombinovanou výrobu elektrické a tepelné energie v palivových článcích. Použití etanolu zvolili kvůli velké kapacitě výroby lihovarského průmyslu a jednoduchosti uskladnění. Následné použití vodíku v malých zařízeních by tak podpořilo lokální producenty bioetanolu a snížilo dovoz fosilních paliv ze zahraničí [19] [20].

3.4 Metylester – esterifikace

Stejně jako u bioetanolu je metylester (bionafta) používán hlavně k ředění motorových paliv. V tomto případě se ale bionafta používá jako náhrada za ropná paliva pro vznětové nikoli zážehové motory. V České republice se jí přidává minimálně 30 % do motorové nafty. Speciálně upravené motory mohou jezdit i na čistou bionaftu. Hlavními výhodami bionafty je její obnovitelnost, biologická odbouratelnost (za 28 dnů je degradováno 95 % bionafty oproti 40 % ropné nafty), nízký obsah emisí a vysoká mazací schopnost. Bionafta je mastnější nežli motorová nafta, přídavek bionafty do motorové nafty snižuje opotřebení motoru. Na druhou stranu nevýhodou je ekonomická náročnost výrobního procesu a vznikající mastné kyseliny při kontaktu s větším množstvím vody, které mohou způsobit korozi palivového systému.

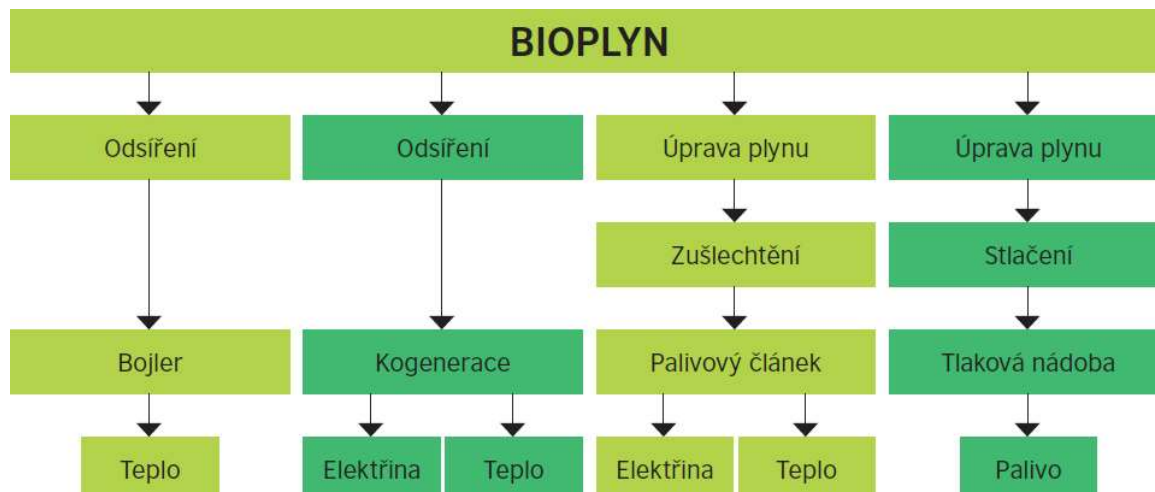
Její využití v kogeneraci není příliš rozšířené a vyskytuje se velmi zřídka. Jedno takové zařízení je provozováno například v německém Bonnu, které týdně spotřebuje 45 000 litrů metylesteru z řepkového oleje. Tato jednotka má výkon 600 kW_e a 700 kW_t. [21]

Důvod malého využívání bionafty pro kogeneraci je spojen převážně s drahou produkcí metylesteru z řepky olejky. Do budoucna se však množství vyrobené elektřiny z bionafty může změnit postupným přecházením na výrobu metylesterů z živočišných tuků a tím souvisejícím snížením výrobních nákladů.

3.5 Bioplyn – anaerobní fermentace

Bioplyn je středně výhřevný plyn, jehož fyzikální a chemické vlastnosti však závisí na materiálových a procesních parametrech. Hlavní složky plynu tvoří metan a oxid uhličitý. Koncentrace metanu se obvykle pohybuje od 50 do 75 %. V ideálním případě jej doplní 25–50 % oxidu uhličitého. V praxi je však surový bioplyn tvořen příměsí dalších minoritních plynů, jejichž tvorba závisí hlavně na složení biomasy, ze které se tvoří. Největší pozornost se věnuje přítomnosti sulfanu pocházejícího zpravidla z biochemických procesů při rozkladu proteinů (bílkovin). Obsah sulfanu v bioplynu je velmi proměnlivý. Při zpracování exkrementů z chovu skotu je jeho obsah zanedbatelný, u exkrementů prasat a drůbeže je naopak velmi vysoký, což působí potíže při následném konečném využití bioplynu. Výhřevnost plynu je dána hlavně přítomností metanu a minoritní složky na to nemají velký vliv. Výhřevnost je stejně velká jako spalné teplo, protože bioplyn neobsahuje žádnou vodní páru, a pohybuje se mezi 18 a 25 MJ/m³, což odpovídá 50–70 % metanu v bioplynu. [22]

Díky poměrně vysoké výhřevnosti má plyn, vyprodukovaný pomocí anaerobní fermentace, široké spektrum využití. Limitujícími faktory je akorát případný vysoký obsah nežádoucích látek jako je sulfan nebo velký obsah oxidu uhličitého. Plyn se tedy případně musí čistit nebo zušlechtovat. Po provedení těchto kroků se plyn může energeticky využít. Některé možnosti využití bioplynu jsou uvedené v obrázku 3.2. K dalšímu příkladu využití by se mohlo přidat například využití biometanu pro pohon automobilů. V tomto případě je bioplyn zbaven oxidu uhličitého, aby měl plyn výhřevnost blízká čistému metanu (35,8 MJ/m³).

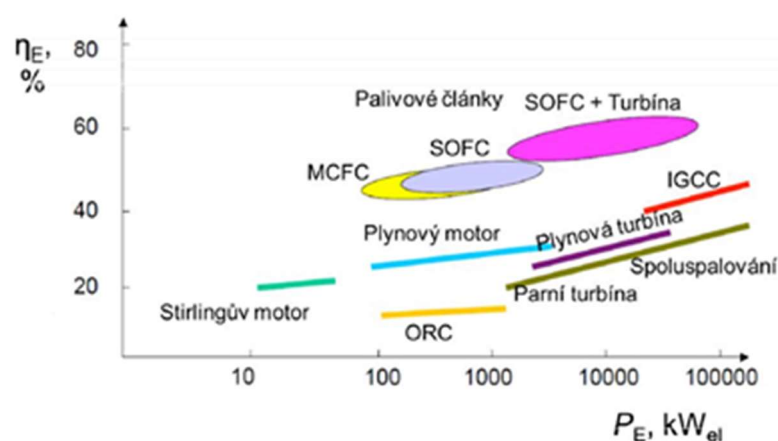


Obrázek 3.2: Možnosti využití bioplynu [23]

Proces zbavování přítomnosti nebo snižování obsahu CO₂ v bioplynu se také využívá za účelem dodávky plynu do rozvodné sítě pro zemní plyn. Toho se využívá například ve Švédsku, kde je tento způsob nejrozšířenějším využitím bioplynu.

V České republice však nejvíce bioplynu směřuje do kogenerační výroby tepla a elektřiny. Nejčastěji se plyn spotřebovává v blízkosti bioplynové stanice, kde je plyn případně čištěn za účelem snížení obsahu sulfanu. Nejpoužívanějším zařízením využívajícím bioplyn je plynový motor, který se hodí pro kogeneraci malých výkonů. Pro malé výkony jsou také používány palivové články případně i Stirlingův motor nebo také ORC oběh, jak je vidět v obrázku 3.3.

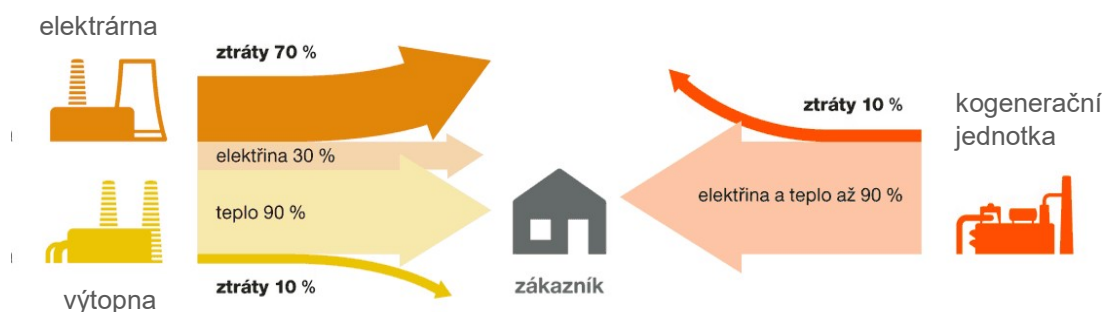
Stirlingův motor a ORC se ale používají spíše pro méně kvalitní paliva, protože jsou to tepelné systémy, které nepoužívají výhřevný plyn jako pohonnou látku uvnitř, ale využívají ho k ohřevu pohonného média. Jejich principy jsou poté popsány v následující kapitole.



Obrázek 3.3: Výkonové schéma jednotlivých technologií a jejich účinnost [4]

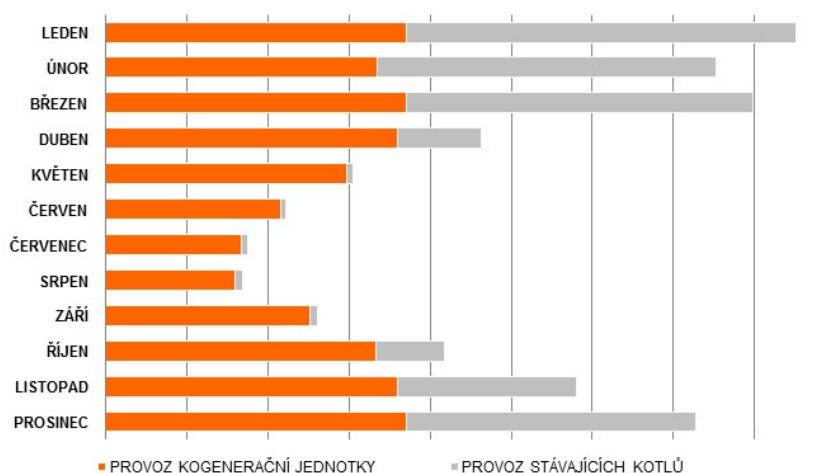
4 Kogenerační zařízení malých výkonů

Hlavní důvodem používání zařízení pro kombinovanou výrobu elektřiny a tepla je úspora primární energie. To znamená využití energie co nejefektivněji s co nejvyšší účinností. Při výrobě elektřiny v elektrárnách se využije přibližně pouze jedna třetina energie přivedená v palivu a zbytek odchází jako odpadní teplo. Při kogenerační výrobě se však může využít až 90 % energie obsažené v palivu, jak je znázorněno na obrázku 4.1.



Obrázek 4.1: Naznačení úspory primární energie [24]

Realizace kogeneračních zařízení pro malé výkony se hodí zejména tam, kde je stálý odbyt tepla i mimo topnou sezónu. To znamená, že se jednotky s malým výkonem můžou využívat například v hotelech či nemocnicích, kde je stálá dodávka tepla pro ohřev vody i v letních měsících. Také se jí často využívá pro centrální zásobování teplem na sídlištích a v administrativních budovách. Nevýhodou však jsou vyšší investiční náklady a návratnost těchto výdajů závisí hlavně na účelném spotřebovávání tepla. To znamená, že je lepší postavit kogenerační jednotku (KJ) s menším výkonem a k tomu přistavit akumulaci nádrží, která v případě potřeby do sítě dodá teplo a v případě nadvýroby uskladní teplo uvnitř. Drtivá většina takto postavených zařízení tedy má akumulaci nádrží. Mezi výjimky však můžou patřit některé průmyslové provozy, které teplo nepřetržitě spotřebovávají bez větších výkyvů. Jelikož se však v Česku výrazně liší spotřeba tepla během roku a provoz některých kogeneračních zařízení by nebyl ekonomický v letních měsících, používají pro výrobu tepla také výtopny. Pro představu je v grafu na obrázku 4.2 znázorněn poměr výroby tepla pomocí kogenerace vůči vyrobenému teplu ve výtopnách. Z toho můžeme vidět, že výtopny se používají pouze jako špičkový zdroj v topné sezóně.



Obrázek 4.2: Poměr vyrobeného tepla skupinou ČEZ z výtopen a KJ

Hlavními výhodami KJ malých výkonů je možnost jejich umístění prakticky kdekoli. Tím se zkrátí délka distribuční sítě a dochází k menším ztrátám tepla. Navíc si i při malém výkonu zachovávají vysokou účinnost provozu. Účinnost výroby bývá často rozhodujícím faktorem pro výběr technologie, která ke kogeneraci bude sloužit. To platí obzvláště o účinnosti výroby elektřiny, která se může významně lišit. Tu můžeme vidět v tabulce 4.1, kde je vypsán i teplotní modul, což je poměr mezi vyrobenou elektřinou a teplem.

Tabulka 4.1: Vlastnosti zařízení pro kogeneraci [25]

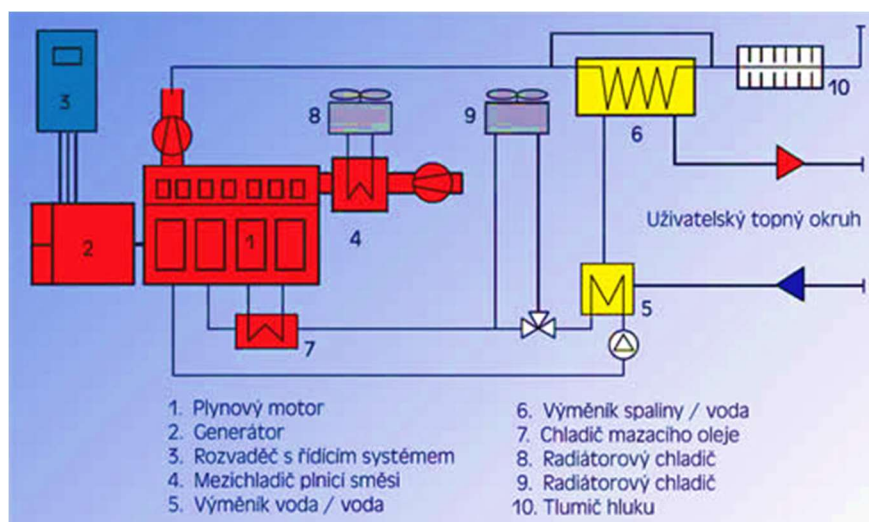
Typ KJ	Elektrický výkon	Elektrická účinnost	Celková účinnost	Teplotní modul
	MW	%	%	[°C]
Palivové články	0,005 - 50	37–60	85–90	0,8 – 1,3
Parní turbína	> 0,5	10–30	60–85	0,1 – 0,5
ORC	0,2 – 2	15–20	65–85	0,1 – 0,3
Mikroturbína	0,025 – 0,25	30–40	65–85	0,6 – 0,8
Spalovací turbína	> 1	25–45	75–90	0,4 – 0,8
Stirlingův motor	0,002 – 0,15	20–35	70–85	0,3 – 0,7
Spalovací motor	0,01 - 5	25–45	75–90	0,5 – 1,1

V některých případech se však nemusí hledět na účinnost, ale hlavním faktorem bývá spolehlivá dodávka elektrického proudu, například v nemocnicích, kde je kladen velký důraz na bezpečnost dodávky elektrické energie. Pro tyto případy se nejčastěji používají KJ se spalovacím motorem, hlavně díky spolehlivosti a vyzkoušené konstrukci.

4.1 Spalovací motory

Běžné kogenerační jednotky mají obvykle relativně malý výkon, desítky až stovky kW elektrického výkonu. Jejich základní částí je obvykle pístový spalovací motor. Palivem je nejčastěji zemní plyn, bioplyn nebo skládkový plyn. Palivem však bývá i dřevoplyn, získávaný v zplyňovacím generátoru.

Kogenerační jednotka (na obrázku 4.3) se skládá ze spalovacího motoru pohánějícího přímo alternátor vyrábějící elektřinu.



Obrázek 4.3: Schéma kogenerační výroby pomocí spalovacího motoru [26]

Dalé jsou zde výměníky pro využití odpadního tepla z motoru. To je z motoru odváděno pomocí dvou výměníků na dvou teplotních úrovních. První výměník odvádí teplo z bloku motoru a z oleje na úrovni cca 80–90 °C. Druhý výměník odvádí teplo z výfukových spalin o teplotách v rozmezí 400–500 °C. Výměníky jsou z hlediska průtoku teplotního média zapojeny do série. Obvykle jsou kogenerační jednotky koncipovány pro dodávku tepla do teplovodního systému 90/70 °C, používají se ale i pro systémy, kde otopná voda dosahuje 110 °C, výjimečně se spalovací motory používají pro výrobu páry. Výroba vysokotlaké páry ale značně snižuje účinnost zařízení, takže je výroba omezena pouze na nízkotlakou [26].

Spalovací motory používané pro kogenerace se výrazně neliší od mobilních motorů. Podle způsobů zapálení směsi vzduchu s palivem se dělí na:

- vznětové motory
- zážehové motory

U *vznětových motorů* je palivo vstřikováno do horkého stlačeného vzduchu, kde se směs zapálí sama po dosažení zápalných hodnot. Účinnost těchto motorů na hřídeli je 35 až 45 %. Jednotkový výkon může dosahovat až 25 MW.

U *zážehových motorů* dochází k zapálení směsi paliva pomocí elektrické jiskry. Spojková účinnost je nižší než u zážehových motorů, pohybuje se mezi 27 až 43 %. K zapálení paliva může docházet buď přímo ve spalovací komoře anebo v zápalné komoře. Motory se zápalnou komorou mají účinnost podobnou jako vznětové motory, kolem 43 %.

Pro kogeneraci je na rozdíl od motorů v automobilech výhodnější používat plynná paliva, kvůli nižší ceně. Pro provoz na plyn je ale nutné motor konstrukčně upravit. Jedná se především o úpravu palivového systému a spalovacího prostoru. V palivovém systému je totiž připravována směs plynu a vzduchu na požadované složení. Pro tyto motory se poté používá označení plynový motor. Tyto motory následně pracují s klasickým plynovým cyklem, kdy nasátý vzduch je stlačen, po vstřiku a zažehnutí (vznícení) paliva se ohřeje, čímž se značně zvýší jeho objem, respektive v uzavřeném prostoru tlak, a při následné expanzi je tato tlaková energie transformována na mechanickou práci.

Plynové motory jsou zpravidla zážehové motory provozované na nižší otáčky, aby vydržely dlouhodobé namáhání. U malých výkonů se nepoužívá převodovka a u nejmenších zařízení se jako generátor používá asynchronní motor, aby se minimalizovali investiční náklady. Celkově mezi malými kogeneračními technologiemi mají spalovací motory nejmenší investiční náročnost vztáhnoutou na instalovaný výkon. Mají ale i jisté nevýhody, například nutnost častých odstávek kvůli údržbě namáhaných součástí nebo nutnost zajištění ochrany proti hluku. Další výhody a nevýhody jsou uvedeny v tabulce 4.2.

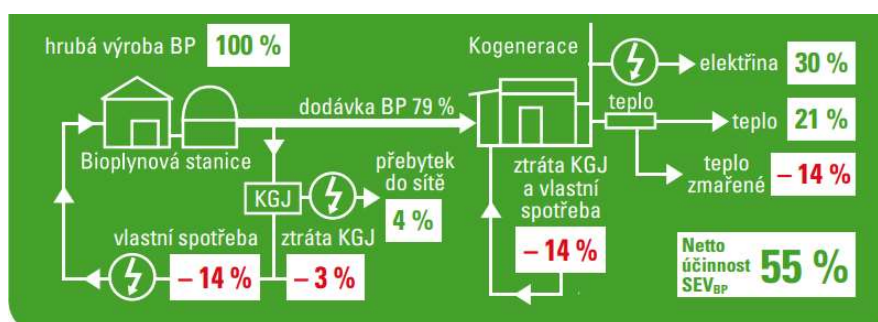
Tabulka 4.2: Výhody a nevýhody KJ se spalovacím motorem

Výhody:	Nízké investiční náklady
	Vysoká spolehlivost a odzkoušená technologie
	Rychlý náběh na plný výkon
	Vysoká účinnost výroby elektrické energie
Nevýhody:	Nutnost kvalitního očištěného paliva
	Velká hlučnost
	Vysoké náklady na údržbu

4.1.1 Spalovací motor na bioplyn

Kogenační zařízení se spalovacím motorem se stavějí hlavně v blízkosti bioplynových stanic, které produkují bioplyn, což je palivo velice vhodné pro plynový motor. Toho využívají například v bioplynové stanici v Suchohrdlech na Znojemsku, kde použili pro kogenační výrobu hned tři spalovací motory o výkonu 165 kW_e. Výhodou tohoto provedení může být odstavení některého motoru, aby mohli jet ostatní na plný výkon, čímž se dosahuje vyšší účinnosti. Také se tím zajišťuje bezpečnost dodávky tepla a elektřiny. Nevýhodou však jsou vyšší náklady na údržbu a investici [27].

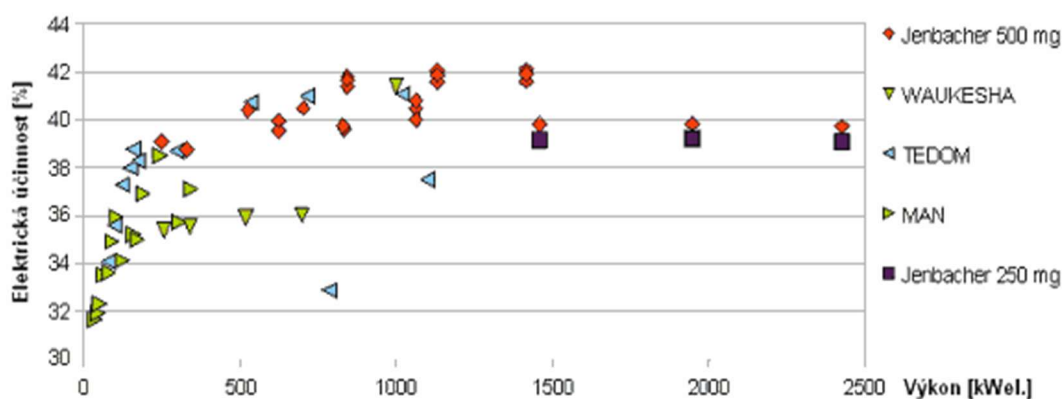
Na výrobu bioplynu pro pohon jednotky se zde týdně použije 112 tun kukuřičné siláže a 70 tun prasečí kejdy. V suchohrdlech uvádějí že produkce bioplynu pro kogeneraci dosahuje účinnosti přibližně 80 %, kde jsou zahrnuté technologické ztráty BPS, vlastní spotřeba kogenační výroby a spotřeba energie v areálu výroby. Není zde ale zahrnutá potřebná energie na ohřev materiálu v bioplynové stanici, kde se spotřebovává přibližně 15–30 % energie bioplynu. Celková účinnost bioplynové stanice tedy může vypadat jako na obrázku 4.4 [27].



Obrázek 4.4: Modelový výpočet stupně energetického využití (SEV_{BP}) s využitím tepla z kogenační jednotky [28]

4.1.2 Účinnost spalovacích motorů

Elektrická účinnost spalovacích motorů může být rozhodujícím faktorem pro výběr jednotky. Ta se ve velkém rozmezí výkonů, které plynové motory dosahují zvyšuje s rostoucím výkonem viz obrázek 4.5. S rostoucím výkonem roste také modul teplotní výroby, který s tím úzce souvisí. Na rozdíl od elektrické účinnosti, celková účinnost zůstává přibližně konstantní [29].

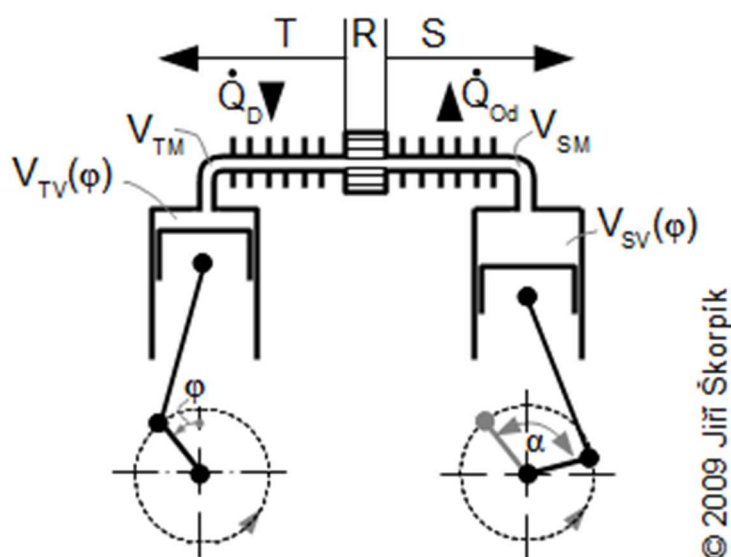


Obrázek 4.5: Elektrická účinnost spalovacích motorů [29]

4.2 Stirlingův motor

Stirlingův motor je stejně jako spalovací motor pístový stroj. Má však mnohem delší historii, která sahá až k začátku 19. století. Na konci tohoto století ale přišel rozvoj spalovacích motorů a princip motoru s vnějším spalováním se přestal využívat. V posledních letech se ale jeho koncept jeví dobře pro kogenerační výrobu i samostatnou výrobu elektřiny díky vysoké účinnosti. Stirlingův motor je stroj s vnějším přestupem tepla (teplo je do oběhu přiváděno/odváděno přes teplosměnné plochy). Tato vlastnost teoreticky umožňuje Stirlingovu motoru využívat jakéhokoli zdroje tepla.

Stirlingův motor se skládá ze tří základních částí (teplá a studená strana a regenerátor), jak je vidět na obrázku 4.6.



Obrázek 4.6: Schéma Stirlingova motoru

T teplá strana motoru; *R* regenerátor; *S* studená strana motoru. Q_D tepelný tok do motoru (ohřev); Q_{Od} tepelný tok z motoru (chlazení) [30]

Je to tepelný stroj, který koná práci v závislosti na změně objemu, tlaku a teploty plynu ve válcích. Pracovní plyn je přesouván pomocí pístů mezi teplou a studenou stranou motoru přes regenerátor. Posuvem pístů, které jsou ve vzájemné kinematické vazbě, se mění pracovní objem, ve kterém je plyn uzavřen. Zároveň přesouváním pracovního plynu mezi teplou a studenou stranou dochází ke změně jeho střední teploty i tlaku. Regenerátor pak tuto vlastnost využívá k regeneraci tepla. Tím se zvyšuje celková účinnost oběhu [30].

Tabulka 4.3: Výhody a nevýhody Stirlingova motoru

Výhody:	Možnost využití různých zdrojů tepla
	Nízké emise CO a NO _x
	Vysoká účinnost u malých výkonů
	Nízká hlučnost
Nevýhody:	Dlouhá návratnost investice
	Špatná regulovatelnost
	Technická náročnost na těsnění válců

4.2.1 Možnosti využití Stirlingova motoru

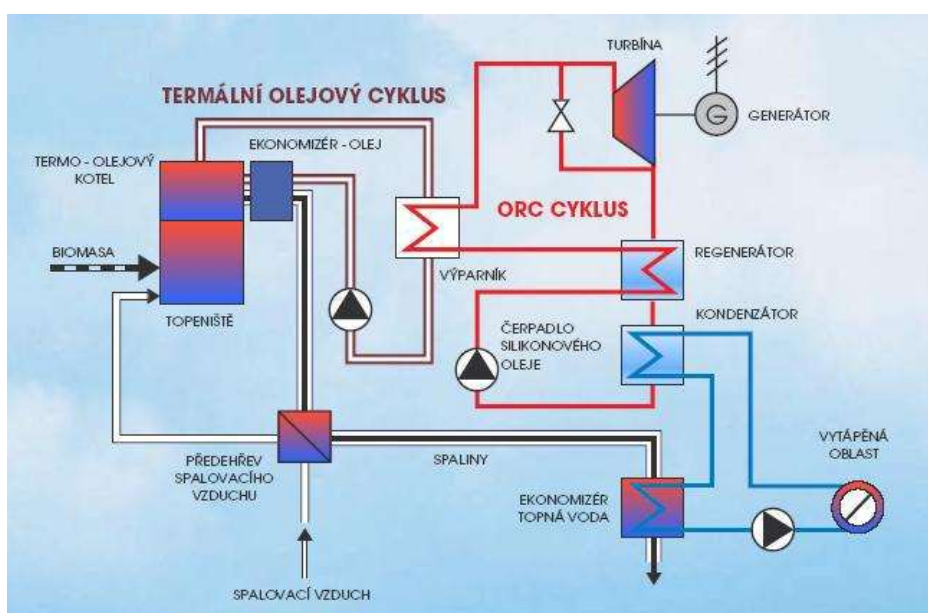
Díky vysoké účinnosti při malých výkonech a nízké hlučnosti je Stirlingův motor vhodný pro zařazení do domácností. Celkově se vývoj těchto motorů soustředí na segment mikrokogenerace, což jsou jednotky s elektrickým výkonem do 50 kW. V tomto odvětví je nejdále firma United Stirling se svým motorem V 161 o výkonu necelých 10 kW, který jako pracovní látku využívá helium. Tento motor je schopný i částečně regulace výkonu vlivem změny tlaku ve válcích.

Díky zmíněným vlastnostem může být Stirlingův motor použit i v bytových jednotkách. Vysoká cena, kvůli malé sériovosti výroby, tomu však brání. Dalším možným použitím je v objektech s velkými nároky na hlučnost a s potřebou stabilní dodávky. To mohou být například hotely v hustě zastavěné oblasti nebo kancelářské budovy.

4.3 Organický Rankine – Clausiův cyklus s parní turbínou

Dalším zařízením, které využívá biomasy pro ohřev pracovního média je organický Rankine–Clausiův cyklus (ORC). Ten je modifikací klasického Rankinova cyklu využívaného pro elektrárenskou konvenční turbínu. Rozdílem však je použité proudící médium. Místo vody se zde využívají organické látky (silikonový olej, chladiva), které mají vhodné termodynamické vlastnosti pro využití nízko-potenciálního tepla. Organické látky mají totiž výrazně nižší výparné teploty, proto se dají nasadit na recyklaci tepelné energie o nižších úrovních. Tato energie by se v tradičních zařízeních již efektivně využít nedala. Díky tomu se tyto jednotky dají použít i při výkonu okolo 200 kW_e, při kterých mají stále vysokou elektrickou účinnost.

Princip zařízení je velmi podobný jako v zařízeních s RC oběhem. Změna je akorát v tom, že ve výparníku předává olej teplo do sekundárního okruhu, kde se pracovní organická látka vypařuje a dosahuje vyššího tlaku. Organické páry jsou poté vedeny do parní turbíny, kde expandují. Pára je za turbínou vedena do kondenzátoru, kde kondenzuje vlivem odebrání výparného tepla chladicí vodou. Chladicí se voda se tak ohřeje a může dodávat teplo do objektů připojených na tuto tepelnou síť [31].



Obrázek 4.7: Schéma ORC s parní turbínou [31]

4.3.1 Možnosti použití ORC

ORC se dá využít všude tam kde je přebytek nevyužitá tepelné energie, jelikož může využívat i odpadní teplo (například spalin z větší kogenerační jednotky u BPS). Na ORC tedy můžeme nahlížet jako na chladič, který je zapojen na odvod spalin z KJ. Spaliny potom ohřívají organickou látku, která expanduje na turbíně a tím se zvedne elektrická účinnost celého zařízení. Zbylé teplo se poté může využít na ohřev fermentoru nebo v případě většího množství tepla i pro vytápění objektů.

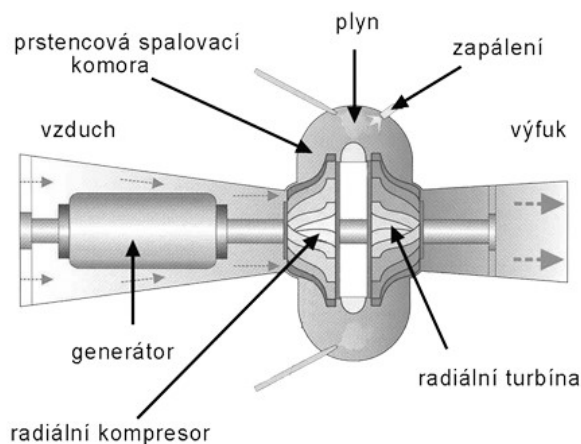
Další využití může být ve vytopnách na biomasu, kde poté celková účinnost dosahuje až 85 %. Toto schéma je zobrazeno na předchozí straně na obrázku 4.7, kde je místo normálního kotle použit olejový kotel s výparníkem. Tohoto principu bylo využito i v kotelně na dřevní štěpku v Bouzově, kde byla instalovaná jednotka o elektrickém výkonu 110 kW_e a tepelné 900 kW_t. Instalovaný horkovodní kotel je dimenzovaný až na 1,2 MW_t a jeho spaliny se využívají právě pro ohřev organické látky v ORC. Pořízení takové jednotky je sice investičně náročné, ale je zde výhled dlouhodobé funkčnosti díky použitému mediu, které nezpůsobuje korozi na turbíně a provozu se na nižší tlakové úrovni než v klasickém RC oběhu [32].

Tabulka 4.4: Výhody a nevýhody ORC

Výhody:	Možnost využití různých paliv
	Dlouhá životnost
	Využití nízko-potenciálního tepla
	Nízké provozní náklady
Nevýhody:	Vysoká cena
	Dlouhá startovací doba

4.4 Mikroturbína

Mikroturbína funguje stejně jako spalovací turbíny, ale její výkony dosahují značně nižších hodnot. Mívají dokonce i menší výkon než turbíny s ORC. Jsou to velmi kompaktní vysokootáčkové stroje obsahující kompresor, spalovací komoru, regenerační výměník, turbínu a generátor. Kvůli dosažení co nejmenších rozměrů je generátor umístěn na stejné hřídeli. To znamená že není potřeba žádný mazací olej, protože zde není převodovka, čímž se docílí větší účinnosti a nižších provozních nákladů.



Obrázek 4.8: Princip mikroturbíny [33]

Mikroturbína znázorněná na obrázku 4.8 funguje následovně: Vzduchový kompresor po roztočení stlačuje vzduch do spalovací komory, kam je pod tlakem přiváděno i palivo. Výbušná směs paliva a vzduchu je jednorázově elektricky zapálena. Hořením se zvyšuje objem a dochází k expanzi přes oběžné kolo turbíny. Po velmi krátkém čase je hoření stabilizováno. Expandující spaliny roztáčejí oběžné kolo turbíny. Přidáváním plynu se zvyšují otáčky a generátor vyrábí elektřinu. Pro generování elektřiny se používají vysokorychlostní generátory, aby vše mohlo být na jedné hřídeli.

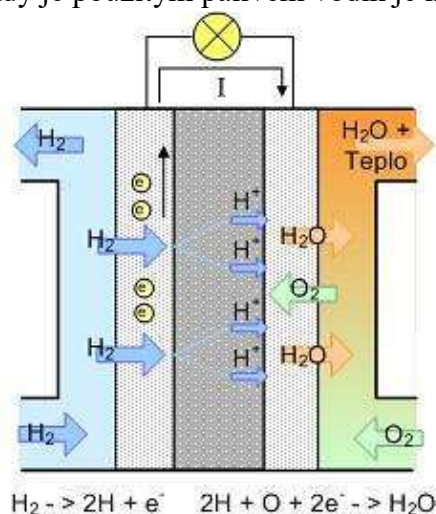
Mezi největší výhody mikroturbín patří její kompaktní rozměry a spolehlivost, nevýhodou však jsou vysoké investiční náklady.

Výhody:	Kompaktní rozměry
	Dlouhá životnost
	Nižší emise než spalovací motory
	Rychlé najíždění a změna výkonu
Nevýhody:	Vysoká cena
	Nutnost kvalitního paliva
	Hlučnost

Mikroturbíny jsou poháněny většinou plynným médiem, které je vháněno o tlaku alespoň 0,4 MPa. Je tedy možné využít bioplynu, který je ale potřeba dostat na vyšší tlakovou úroveň, to znamená snížení účinnosti celého procesu. Možnosti využití mikroturbíny jsou velmi omezené také kvůli vysoké pořizovací ceně při malých výkonech. Velkou výhodou však je možnost využití u bioplynové stanice, kde kolísá obsah metanu v bioplynu. Mikroturbína totiž dokáže pracovat i s bioplynem, který obsahuje pouze 30 % CH₄, a to spalovací motory nezvládnou [34].

4.5 Palivové články

Palivové články jsou zařízení, které mohou přeměňovat chemickou energii obsaženou v palivu přímo na energii elektrickou. Pro svou funkci potřebuje běžný palivový článek kontinuální přísuv paliva, které v článku reaguje s oxidačním činidlem a za vzniku různých sloučenin, v závislosti na typu použitého článku a paliva, dochází k produkci elektrické energie. Zakladní princip, kdy je použitým palivem vodík je možné vidět na obrázku 4.9.



Obrázek 4.9: Princip palivového článku [35]

Každý palivový článek je tvořen třemi hlavními komponenty – anodou, katodou a elektrolytem či membránou. Na anodu článku je přivedeno palivo, například právě vodík jako na obrázku, který díky katalytické příměsi na povrchu anody disociuje na protony a elektrony. Membrána či elektrolyt, jež odděluje anodu od katody, umožňuje průchod pouze kladně nabitým protonům, přičemž volné elektrony prochází oddělenou cestou a jsou příčinou vzniku elektrického proudu. Posledním krokem je sloučení protonů a elektronů s oxidačním činidlem na katodě za vzniku odpadních látek, v případě vodíkového článku je výsledným produktem chemické reakce voda [35].

Typů palivových článků je celá řada. K jejich dělení se využívá hlavně dosahovaná teplota a používaný elektrolyt. Jejich základní rozdělení je v tabulce 4.5.

Tabulka 4.5: Rozdělení palivových článků [36]

Druh	Nízkoteplotní			Středněteplotní	Vysokoteplotní	
	Alkalické AFC (Alkaline Fuel Cells)	Membránové PEMFC (Proton Exchange Membrane Fuel Cells)	Přímé metanolové DMFC (Direct Methanol Fuel Cells)	Kyselé PAFC (Phosphoric Acid Fuel Cells)	S tavenými karbonáty MCFC (Molten Carbonate Fuel Cells)	S pevnými oxidy SOFC (Solid Oxide Fuel Cells)
Elektrolyt	Hydroxid draselný	Iontoměničná membrána	Iontoměničná membrána	Kyselina fosforečná	Tavené karbonáty lithia, vodíku, draslíku	Oxid zirkoničitý s příměsí yttria
Pracovní teplota (°C)	60 – 100	20 – 80	20 – 130	170 – 250	600 – 650	800 – 1000
Pohyblivý iont	OH^-	H^+	H^+	H^+	CO_3^{2-}	O^{2-}
Elektrodové reakce	$\text{A H}_2 + 2\text{OH}^- \rightarrow 2\text{H}_2\text{O} + 2\text{e}^-$ $\text{K } \frac{1}{2}\text{O}_2 + \text{H}_2\text{O} + 2\text{e}^- \rightarrow 2\text{OH}^-$ $\Sigma \text{H}_2 + \frac{1}{2}\text{O}_2 \rightarrow \text{H}_2\text{O}$	$\text{A H}_2 \rightarrow 2\text{H}^+ + 2\text{e}^-$ $\text{K } \frac{1}{2}\text{O}_2 + 2\text{H}^+ + 2\text{e}^- \rightarrow \text{H}_2\text{O}$ $\Sigma \text{H}_2 + \frac{1}{2}\text{O}_2 \rightarrow \text{H}_2\text{O}$	$\text{A CH}_3\text{OH} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CO}_2 + 6\text{H}^+ + 6\text{e}^-$ $\text{K } \frac{3}{2}\text{O}_2 + 6\text{H}^+ + 6\text{e}^- \rightarrow 3\text{H}_2\text{O}$ $\Sigma \text{CH}_3\text{OH} + \frac{3}{2}\text{O}_2 \rightarrow \text{CO}_2 + 2\text{H}_2\text{O}$	$\text{A H}_2 \rightarrow 2\text{H}^+ + 2\text{e}^-$ $\text{K } \frac{1}{2}\text{O}_2 + 2\text{H}^+ + 2\text{e}^- \rightarrow \text{H}_2\text{O}$ $\Sigma \text{H}_2 + \frac{1}{2}\text{O}_2 \rightarrow \text{H}_2\text{O}$	$\text{A H}_2 + \text{CO}_3^{2-} \rightarrow \text{H}_2\text{O} + \text{CO}_2 + 2\text{e}^-$ $\text{K } \frac{1}{2}\text{O}_2 + \text{CO}_2 + 2\text{e}^- \rightarrow \text{CO}_3^{2-}$ $\Sigma \text{H}_2 + \frac{1}{2}\text{O}_2 + \text{CO}_2 \rightarrow \text{H}_2\text{O} + \text{CO}_2$	$\text{A H}_2 + \text{O}^{2-} \rightarrow \text{H}_2\text{O} + 2\text{e}^-$ $\text{K } \frac{1}{2}\text{O}_2 + 2\text{e}^- \rightarrow \text{O}^{2-}$ $\Sigma \text{H}_2 + \frac{1}{2}\text{O}_2 \rightarrow \text{H}_2\text{O}$
Účinnost (%) (elektrická)	45 – 60	40 – 60	40	38 – 45	45 – 60	50 – 65
Výkon(kW)	Do 20	Do 250	Do 10	50 – stovky kW	Do několika MW	Do několika MW
Používané palivo	Vodík	Vodík Reformovaná paliva	Methanol (Ethanol)	Vodík Reformovaná paliva	Vodík Nepřímá paliva	Všechny druhy bez reformování
Možné aplikace	Kosmické lodě, lodě, ponorky	Univerzální	Přenosné články	Výroba energií	Výroba energií	Výroba energií

Jak je vidět v tabulce, tak účinnost elektrické energie, se pohybuje přibližně v rozmezí 40 až 60 procent. V případě použití palivových článků v režimu kombinované výroby elektřiny a tepla se celková účinnost může vyšplhat až na procent 90 %. U některých palivových článků je možné využít metanol produkovaný metanolovým kvašením. Tyto jednotky nedosahují velkých výkonů ani teplot, tudíž je možné jejich použití pro mikrokogeneraci v domácnostech. Pro větší výkony v řádech stovek kW už je potřeba upravené palivo s vysokým obsahem vodíku. Ten by bylo možno získat z bioplynu reformováním paliva. Tento proces je ale energeticky náročná záležitost a snižovalo by to celkovou účinnost výroby elektřiny, kterou se právě palivové články vyznačují.

Tabulka 4.6: Výhody a nevýhody palivových článků

Výhody:

Vysoká elektrická účinnost

Nízké emise nežádoucích látek

Bezhluchý provoz

Nevýhody:

Vysoká cena

Nutnost paliva bohatého na vodík

Dlouhá startovací doba

4.6 Výpočet účinnosti kogeneračních zařízení

Účinnost kombinované výroby tepla a elektřiny je jeden z hlavních ukazatelů kogeneračních zařízení. Čím větší účinnost tím větší jsou úspory primární energie. Pro následující rovnice byl použit zdroj: [6]

Tepelná účinnost se stanovuje se vztahu:

$$\eta_{t(KG)} = \frac{P_{t(KG)}}{H_{(KG)}} \cdot 100 \quad [\%] \quad (4.1)$$

Kde $P_{t(KG)}$ je výroba tepla dodaná do sítě za jednotku času udávaná v J, které je možno získat ze vztahu:

$$P_{t(KG)} = m_{voda} \cdot c_p \cdot \Delta t \quad (4.2)$$

m_{voda} ... hmotnost vody která protékla chladičem za daný čas

c_p ... střední měrná tepelná kapacita vody mezi teplotami t_1 a t_2

Δt ... rozdíl teplot ($t_2 - t_1$) na přívodu a na zpátečce

a $H_{(KG)}$ je energie přivedená v palivu za jednotku času udávaná v J, která se počítá z následujícího vztahu:

$$H_{(KG)} = Q_r^i \cdot m_{pal} \quad (4.3)$$

Q_r^i ... výhřevnost paliva

m_{pal} ... hmotnost přivedeného paliva za daný čas

Pro zjištění celkové účinnosti je potřeba zjistit i účinnost vyrobené elektrické energie která se vypočítá podle následujícího vztahu:

$$\eta_{E(KG)} = \frac{P_{E(KG)}}{H_{(KG)}} \cdot 100 \quad [\%] \quad (4.4)$$

Kde $P_{E(KG)}$ je většinou měřena v kWh a jednoduše se dá přepočítat na J. Pro případ že není měřená, se dá přibližně určit prostřednictvím teplotenského modulu K daného zařízení ze vztahu:

$$P_{E(KG)} = P_{t(KG)} \cdot K \quad (4.5)$$

Celková účinnost kogeneračního zařízení ($\eta_{C(KG)}$) se tedy může stanovit následovně součtem elektrické a tepelné účinnosti:

$$\eta_{C(KG)} = \eta_{E(KG)} + \eta_{t(KG)} \quad [\%] \quad (4.6)$$

Závěr

Cílem mé práce bylo posoudit možnosti využití biomasy pro kogeneraci malých výkonů. Jak již bylo zmíněno v úvodu, toto odvětví energetiky je v současnosti velice rozvíjené a v provozu se zkoušejí i kogenerační jednotky s elektrickým výkonem řádově v jednotkách kilowattů. Takto malá zařízení si i tak zachovávají vysokou účinnost a kompaktnost a jejich použití pro kogeneraci zatím brání akorát vysoké investiční náklady. To by se však postupně mohlo měnit vlivem zvyšování sériovosti výroby těchto jednotek.

Nejkonkurenceschopnější jednotkou malých výkonů tak stále zůstává plynový motor, který jako palivo používá nejčastěji bioplyn. Tato zařízení tak v kogenerační výrobě (do elektrického výkonu 500 kW_e) mají v České republice majoritní zastoupení. Zajímavým segmentem, kde spalovací motory nelze využít, se však jeví využívání odpadního tepla (např. tepla spalín v tepelných elektrárnách). V těchto případech je možnost využít Stirlingův motor nebo turbínu s ORC oběhem. Instalováním takových jednotek se zvýší využití primární energie a také účinnost výroby elektrické energie, což je jeden z cílů evropské energetické koncepce. Jedna z dalších možností zvýšení elektrické účinnosti je použití palivových článků, jejichž účinnost se pohybuje mezi 40 a 60 %. Na to se objevují projekty zejména v Lotyšsku, kde jako palivo s vysokým obsahem vodíku má být použit etanol získaný alkoholovým kvašením. Tím se zvýší nejenom účinnost, ale i využití biomasy jako obnovitelného zdroje.

Alkoholové kvašení patří i v ČR k rozšířeným technologiím produkujícím biopaliva. Ale jen nepatrné množství směřuje do kogenerační výroby. Využívaný pro kogeneraci je však odpad z alkoholové fermentace, jenž směřuje do bioplynových stanic, kde z něho vzniká bioplyn. Ten má ze všech paliv, vzniklých přeměnou biomasy, nejširší uplatnění a díky tomu je nejvíce využíván. Dalším palivem, které se využívá ve větší míře pro kogeneraci je generátorový plyn. Má ale větší obsah dehtů a k jeho produkci je požadováno palivo s velkým obsahem sušiny a nízké vlhkosti. Kapalná paliva se pak ke kogeneraci v České republice nepoužívají skoro vůbec, například vlivem vysoké ceny vstupní suroviny u bionafty. Do budoucna by se cena této komodity však měla snížit, díky používání živočišných tuků pro výrobu metylesteru. Pravděpodobně se dočkáme i snížení ceny kogeneračních zařízení těch nejmenších výkonů, které se budou moct použít ke kogeneraci i v domácnostech.

Seznam použitých zdrojů

- [1] OCHODEK, Tadeáš, Jan KOLONIČKÝ a Pavej JANÁSEK. *Potenciál biomasy, druhy, bilance a vlastnosti paliv z biomasy*. VŠB, b.r. Dostupné také z: <http://www.biomasa-info.cz/cs/doc/prirucka1.pdf>
- [2] KOPPE, Klaus a Dagmar JUCHELKOVÁ. *Nutzung der Biomasse - Využívání biomasy*. Vyd. 1. Ostrava: Repronis, 2003. ISBN 80-732-9035-9.
- [3] *Biomasa jako zdroj energie: sborník příspěvků ... semináře*. Ostrava: VŠB - Technická univerzita, 2006. ISBN 80-248-1182-0.
- [4] POHOŘELÝ, Michael a Michal JEREMIÁŠ. *Zplyňování biomasy – možnosti uplatnění* [online]. 2010 [cit. 2017-04-26]. Dostupné z: <http://biom.cz/cz/odborne-clanky/zplynovani-biomasy-moznosti-uplatneni>
- [5] PEER, Václav a Pavel FRIEDEL. *Zplyňování – principy a reaktory* [online]. b.r., **2016** [cit. 2017-04-27]. Dostupné z: <http://vytapeni.tzb-info.cz/vytapime-tuhymi-palivy/13729-zplynovani-principy-a-reaktory>
- [6] JANDAČKA, Jozef a Marian MIKULÍK. *Techológie pre zvyšovanie energetického potenciálu biomasy*. 2007. ISBN 978-80-969595-4-9.
- [7] OCHODEK, Tadeáš, Jan KOLONIČNÝ a Michal BRANC. *"Technologie pro přípravu a energetické využití biomasy": studie v rámci projektu "Možnosti lokálního vytápění a výroby elektřiny z biomasy"*. 1. vyd. Ostrava: VŠB - Technická univerzita Ostrava, 2007. ISBN 978-80-248-1426-1.
- [8] JÍLKOVÁ, Lenka, Karel CTIHODNÝ a Radek ČERNÝ. *Technologie pro pyrolýzu paliv a odpadů* [online]. In: . VŠCHT Praha, FTOP, Ústav plynárenství, koksochemie a ochrany ovzduší, 2012, s. 9 [cit. 2017-05-16].
- [9] Anaerobní technologie. *BIOPROFIT* [online]. 2007 [cit. 2017-05-06]. Dostupné z: http://www.bioplyn.cz/at_popis.htm
- [10] VÍTĚZ, Tomáš, Lukáš POSPÍŠIL a Zbyšek KARAFIÁT. Bioplynové stanice na „suchou“ fermentaci – šance pro energetické využití biologicky rozložitelných odpadů (BRO). *Biom* [online]. 2009 [cit. 2017-05-08]. ISSN 1801-2655. Dostupné z: <http://biom.cz/cz/odborne-clanky/bioplynove-stanice-na-suchou-fermentaci-sance-pro-energeticke-vyuziti-biologicky-rozlozitelnych-odpadu-bro>
- [11] MOUDRÝ, Jan a Jana KALINOVÁ. *Energetické využití biomasy* [online]. 2004 [cit. 2017-05-09]. Dostupné z: <http://www2.zf.jcu.cz/~moudry/skripta/4/index.html>
- [12] VÁŇA, Jaroslav. Trvale udržitelná výroba bioetanolu. *Biom.cz* [online]. 2006 [cit. 2017-05-10]. Dostupné z: <http://biom.cz/cz/odborne-clanky/trvale-udrzitelna-vyroba-bioetanolu>
- [13] VÍŠEK, Luboš a Michal POKORNÝ. Výroba esterů mastných kyselin z odpadních živočišných tuků. *Chemické listy*. b.r., **2013**.
- [14] POHOŘELÝ, Michal a Michal JEREMIÁŠ. Zplyňování biomasy. *Chemické listy* [online]. b.r., **2012**(106) [cit. 2017-05-22].
- [15] ZÁMOSTNÝ, Petr a Ladislav KURC. Vliv podmínek a složení suroviny na pyrolýzu dřevní hmoty. *Chemické listy*. b.r., **2011**(105).

- [16] JEVIČ, Petr a Zdeňka ŠEDIVÁ. *Analýza možností a návrh strategie pro rozšíření a komerční využití moderních biopaliv s ohledem na emise skleníkových plynů a nepřímě změny na využívání půdy*. Praha, 2013.
- [17] HROMÁDKO, Jan. *Moderní poznatky v oblasti využití bioetanolu* [online]. In: LISTY CUKROVARNICKÉ A ŘEPAŘSKÉ. Česká zemědělská univerzita v Praze, 2014 [cit. 2017-05-16].
- [18] Ethanol Power Plant, Minas Gerais, Brazil. *Power-technology.com* [online]. b.r. [cit. 2017-05-23]. Dostupné z: <http://www.power-technology.com/projects/ethanol-power-plant/>
- [19] MARKOVA, Darja a Jakaterina RUSANOVA. *Integration of Bioethanol Fuel Cell Cogeneration Systems into Latvian Energy Supply System* [online]. b.r., 2010 [cit. 2017-05-16]. ISSN 0861-0762. Dostupné z: http://meteorology.meteo.bg/global-change/BJMH_E.doc
- [20] APPLEYARD, David. *Bioethanol plant fuelling CHP facility* [online]. 2014 [cit. 2017-05-16]. Dostupné z: <http://www.decentralized-energy.com/articles/2014/10/bioethanol-plant-fuelling-chp-facility.html>
- [21] ADAMSICK, Claire. *The Power of Rapeseed* [online]. In: . 2004 [cit. 2017-05-18].
- [22] KÁRA, Jaroslav, Zdeněk PASTOREK a Evžen PŘIBYL. *Výroba a využití bioplynu v zemědělství*. VÚZT, v.v.i, 2007. ISBN 978-80-86884-28-8. Dostupné také z: <http://www.vuzt.cz/svt/vuzt/publ/P2007/086.PDF>
- [23] BERÁNEK, Daniel. Bioplynové stanice. *Bioplynovestanice.cz* [online]. 2012 [cit. 2017-05-17]. Dostupné z: <http://docplayer.cz/5736739-Bioplynove-stance-daniel-beranek-iss-nova-paka-kumburska-846-nova-paka.html>
- [24] O kogeneraci. In: ČEZ Energo [online]. b.r. [cit. 2017-05-18]. Dostupné z: <http://www.cezenergo.cz/cs/o-kogeneraci.html>
- [25] DVORSKÝ, Emil a Pavla HEJTMÁNKOVÁ. *Kombinovaná výroba elektrické a tepelné energie*. 1. vyd. Praha: BEN - technická literatura, 2005. ISBN 80-730-0118-7.
- [26] Kogenerace. *EkoWATT* [online]. 2008 [cit. 2017-05-19]. Dostupné z: <https://ekowatt.cz/uspory/kogenerace.shtml>
- [27] MORAVEC, Adam. Analýza ročního provozu bioplynové stanice. *Biom.cz* [online]. 2013 [cit. 2017-05-20]. Dostupné z: <http://odpady-online.cz/analiza-rocnihoprovozu-bioplynove-stance/>
- [28] SEVEN STŘEDISKO PRO EFEKTIVNÍ VYUŽÍVÁNÍ ENERGIE. *Energetická efektivnost bioplynových stanic*. 2011. Dostupné také z: <http://www.czba.cz/files/ceska-bioplynova-asociace/uploads/files/EnEfBPS-komplet.pdf>
- [29] BECHNÍK, Bronislav a Pavel BLÁHA. Bioplynová stanice s kogenerační jednotkou pro dodávky elektřiny ve špičkách. *Tzbinfo* [online]. b.r., 2009 [cit. 2017-05-20]. Dostupné z: <http://energetika.tzb-info.cz/kogenerace/5776-bioplynova-stance-s-kogeneracni-jednotkou-pro-dodavky-elektriny-ve-spickach>
- [30] ŠKORPÍK, Jiří. Stirlingův motor. *Transformační technologie* [online]. b.r., 2013 [cit. 2017-05-20]. Dostupné z: <http://www.transformacni-technologie.cz/33.html#menu>

-
- [31] KUNC, Jan a Libor NOVÁK. Biomasa - efektivní palivo pro ORC technologii. *TZB-info* [online]. 2005 [cit. 2017-05-21]. Dostupné z: <http://www.tzb-info.cz/2455-biomasa-efektivni-palivo-pro-orc-technologie>
- [32] PAVELKOVÁ, Eva a Iva ŽIVELOVÁ. Posouzení ekonomické efektivnosti výroby elektrické energie z odpadního tepla. *Elktrorevue* [online]. b.r., **2011**(2) [cit. 2017-05-21]. ISSN 1213-1539.
- [33] Mikroturbína. *Asociace mikroturbín* [online]. b.r. [cit. 2017-05-21]. Dostupné z: <http://www.mikroturbina.cz/mikroturbina>
- [34] Mikroturbína a bioplyn - zdroj budoucích generací?. *TZB-info* [online]. 2006 [cit. 2017-05-21]. Dostupné z: <http://www.tzb-info.cz/102250-mikroturbina-a-bioplyn-zdroj-budoucich-generaci>
- [35] MAJLING, Eduard. Palivové články – princip funkce a dělení. *Oenergetice.cz* [online]. 2015 [cit. 2017-05-21]. Dostupné z: <http://oenergetice.cz/technologie/elektroenergetika/palivove-clanky-princip-funkce-a-deleni/>
- [36] ČESKÝ, Antonín. *Palivové články - progresivní technologie pro ekologickou výrobu energie* [online]. In: . 2003 [cit. 2017-05-22].

Seznam použitých symbolů

c_p	$\left[\frac{J}{kg \cdot K} \right]$	Měrná tepelná kapacita
$H_{(KG)}$	[J]	Energie přivedené v palivu
K	[-]	Teplárenský modul
m_{pal}	[kg]	Hmotnost paliva
m_{voda}	[kg]	Hmotnost vody
$P_{E(KG)}$	[J]	Vyrobená elektřina za daný čas
$P_{t(KG)}$	[J]	Vyrobené teplo za daný čas
Q_r^i	$\left[\frac{J}{kg} \right]$	Výhřevnost paliva
SEV_{BP}	[%]	Stupeň energetického využití bioplynové stanice
Δt	[K]	Rozdíl teplot
$\eta_{C(KG)}$	[%]	Celková účinnost kogenerace
$\eta_{E(KG)}$	[%]	Účinnost vyrobené elektřiny při kogeneraci
$\eta_{t(KG)}$	[%]	Účinnost vyrobeného tepla při kogeneraci

Seznam použitých zkratek

AFME	Metylester z živočišných tuků (animal fatty acid methyl ester)
BPS	Bioplynová stanice
ČOV	Čistička odpadních vod
E85	Etanol o obsahu 85 % (15 % - benzín)
FAME	Metylestery mastných kyselin
GHG	Emise skleníkových plynů (green house gas emission)
KJ	Kogenerační jednotka
KVET	Kombinovaná výroba elektřiny a tepla
MEŘO	Metylester z řepkového oleje
ORC	Organický Rankine-Clausiusův oběh
RC	Rankine-Clausiusův oběh

Seznam použitých obrázků

Obrázek 2.1: Rozdělení technologií zpracování biomasy a hlavní produkty.....	13
Obrázek 2.2: Orientační výkon různých zplyňovacích generátorů [4] [6].....	15
Obrázek 2.3: Schéma reaktorů s pevným ložem [5]	15
Obrázek 2.4 Příprava metylesteru z živočišných tuků [13]	22
Obrázek 3.1: Možnosti využití pyrolýzního oleje [16]	24
Obrázek 3.2: Možnosti využití bioplynu [23]	26
Obrázek 3.3: Výkonové schéma jednotlivých technologií a jejich účinnost [4].....	27
Obrázek 4.1: Naznačení úspory primární energie [24]	28
Obrázek 4.2: Poměr vyrobeného tepla skupinou ČEZ z vytopen a KJ	28
Obrázek 4.3: Schéma kogenerační výroby pomocí spalovacího motoru [26]	29
Obrázek 4.4: Modelový výpočet stupně energetického využití (SEV_{BP}) s využitím tepla z kogenerační jednotky [28].....	31
Obrázek 4.5: Elektrická účinnost spalovacích motorů [29]	31
Obrázek 4.6: Schéma Stirlingova motoru	32
Obrázek 4.7: Schéma ORC s parní turbínou [31]	33
Obrázek 4.8: Princip mikroturbíny [33].....	34
Obrázek 4.9: Princip palivového článku [35].....	35

Seznam použitých tabulek

Tabulka 2.1: Složení plynu při zplyňování dřeva o obsahu vody 20 hm. % [3].....	14
Tabulka 2.2: Porovnání reaktorů s pevným ložem [6].....	16
Tabulka 2.3: Orientační podíl produktů při pomalé a rychlé pyrolýze [6].....	17
Tabulka 2.4: Srovnání různých bioplynů [9]	18
Tabulka 2.5: Specifikace záměrně pěstovaných zemědělských plodin [11]	20
Tabulka 2.6: optimální parametry hydrolýzy pro výrobu bioetanolu [12]	21
Tabulka 2.7: Srovnání faktoru GHG surovin pro výrobu biopaliv [13]	22
Tabulka 4.1: Vlastnosti zařízení pro kogeneraci [25].....	29
Tabulka 4.2: Výhody a nevýhody KJ se spalovacím motorem	30
Tabulka 4.3: Výhody a nevýhody Stirlingova motoru	32
Tabulka 4.4: Výhody a nevýhody ORC.....	34
Tabulka 4.5: Rozdělení palivových článků [36].....	36
Tabulka 4.6: Výhody a nevýhody palivových článků	36